

Jaderná fyzika

Jaderná fyzika

- Jaderná fyzika se zabývá jádrem atomu, což je objekt asi 10^5 krát menší než celý atom ($10^{-15} - 10^{-14}$ m), obsahující však prakticky veškerou hmotnost atomu.
- Nalezneme v něm dvě částice:
 - protony
 - neutrony
- Jsou prakticky identické, proton má však náboj kladný (+e), zatímco neutron je bez náboje.

$$m_p = 1,6726231 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$
$$m_n = 1,6749272 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Jaderné síly

- protony + neutrony = nukleony
- Protože nukleony nemohou být v jádře vázány ani silami gravitačními, ani elektrickými, bylo nutno zavést nový druh sil, a to tzv. síly jaderné (silné).
- Vlastnosti jaderných sil silných:
 - přitažlivé bez ohledu na náboj nukleonu
 - nejintenzivnější ze všech druhů sil
 - Jsou tak „intenzivní“, že překonají i odpudivé (coulombické) síly elektrické, působící mezi kladně nabitými protony.

Druhy interakcí (sil):

- elektromagnetická
- gravitační
- jaderná silná
 - Na rozdíl od sil gravitačních a elmg. mají však pouze krátký dosah (asi $2 \cdot 10^{-15}$ m).
 - Jeví stav nasycení, tzn. nejsou schopny vytvořit jakkoli velká jádra.
 - Určitý nukleon interaguje pouze s několika svými nejbližšími sousedy. Mezi běžně se vyskytujícími prvky je jedním z největších jádro uranu s 238 nukleony.
 - [Simulace](#)
- jaderná slabá

Síly a interakce

Zodpovědná za většinu rozpadů v přírodě.

Typická pro atomy, molekuly, strukturu pevných látek, je také schopna produkovat nové částice a způsobit rozpad některých částic.

Typická pro produkci nových částic nebo pro velmi rychlé rozpady, jádro drží pohromadě díky silné interakci.

Vlastnosti \ Interakce	Gravitační	Slabá (Elektroslabá)	Elektromagnetická	Silná	
				Základní	Zbytková
„Náboj“, na který působí:	hmota	vůně	elektrický náboj	barevný náboj	viz. odstavec o zbytkové silné interakci
Částice, které ji cítí:	všechny	kvarky, leptony	elektricky nabitě	kvarky, gluony	hadrony
Zprostředkující částice:	graviton (dosud neobjeven)	W^+ W^- Z^0	γ	gluony	mesony
Síla v poměru k elektromagnetické mezi dvěma u kvarky ve vzdálenosti ... a mezi dvěma protony v jádře	10^{-41}	0.8	1	25	netýká se kvarků
	10^{-41}	10^{-4}	1	60	
	10^{-36}	10^{-7}	1	netýká se hadronů	20

Působí mezi všemi částicemi, ale v mikrosvětě je zanedbatelná.

Působí mezi všemi kvarky a leptony, ale pouze na velmi krátkých vzdálenostech, menších než 10^{-18} m.

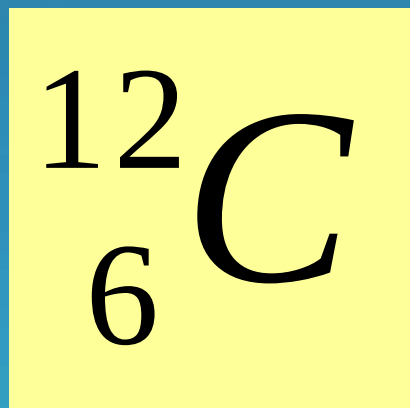
Působí jen mezi nabitými částicemi. Zprostředkující částicí je nehmotný foton a proto mají elektromagnetické síly nekonečný dosah.

Při popisu vzájemného působení objektů v makrosvětě se osvědčil pojem síly. V mikrosvětě častěji používáme univerzálnější pojem **interakce**, abychom mohli mluvit o celé plejádě procesů, které ve srážkách částic nastávají.

Silná vazba barevně neutrálních protonů a neutronů tvořících jádro je způsobena **zbytkovou silnou interakcí** mezi jejich barevnými složkami. Je to podobné jako zbytková elektromagnetická interakce, která váže elektricky neutrální atomy do molekul. Lze ji také chápat jako výměnu mezonů mezi hadrony.

Počet částic v atomu

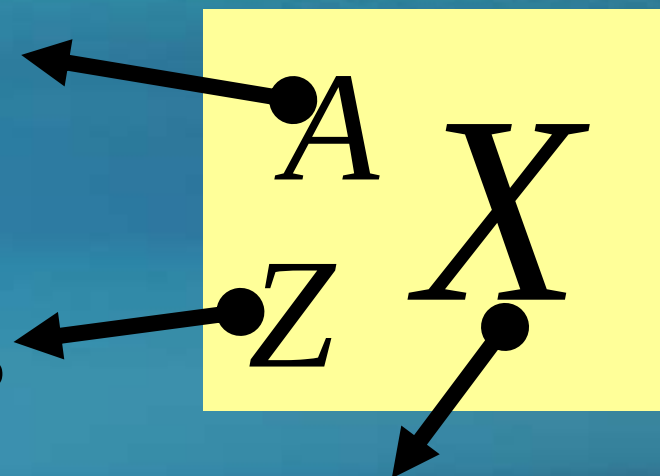
- Počet protonů v jádře udává protonové číslo (Z).
- Počet nukleonů v jádře udává nukleonové číslo (A).



nukleonové číslo

protonové číslo

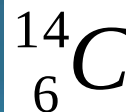
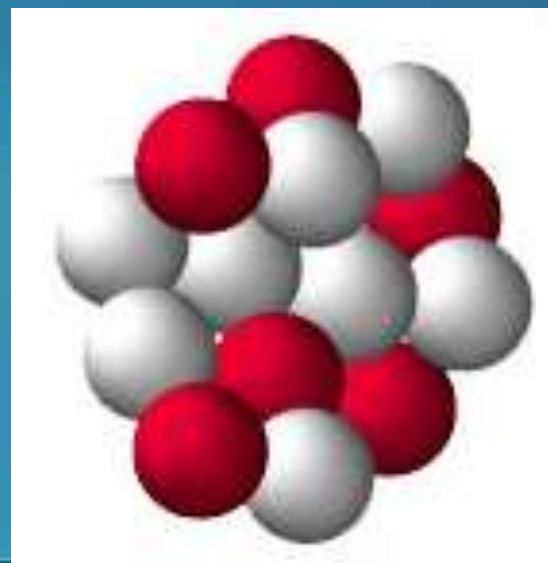
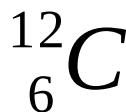
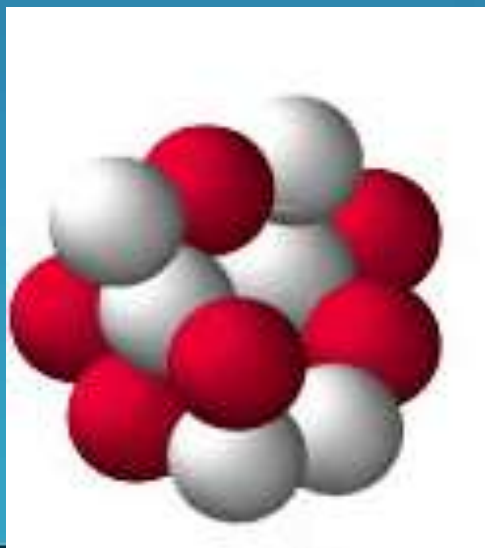
značka chemického prvku



Např. toto jádro uhlíku obsahuje
6 protonů a 6 neutronů.

Protonové číslo

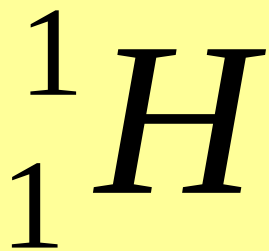
- určuje počet elektronů v elektronovém obalu a tím i typ chemického prvku. Udává pořadí prvku v periodické tabulce.
- Mají-li jádra stejná protonová, ale různá nukleonová čísla mluvíme o izotopech daného prvku.



Periodická soustava prvků

		S K U P I N Y																	
		I. A	II. A	III. B	IV. B	V. B	VI. B	VII. B	VIII. B		I. B	II. B	III. A	IV. A	V. A	VI. A	VII. A	VIII. A	
P E R I O D Y	1	1 H vodík																	2 He helium
	2	3 Li litium	4 Be beryllium											5 B bor	6 C uhlík	7 N dusík	8 O kyslík	9 F fluor	10 Ne neon
	3	11 Na sodík	12 Mg hořčík											13 Al hliník	14 Si křemík	15 P fosfor	16 S síra	17 Cl chlor	18 Ar argon
	4	19 K draslík	20 Ca vápník	21 Sc skandium	22 Ti titan	23 V vanád	24 Cr chrom	25 Mn mangan	26 Fe železo	27 Co kobalt	28 Ni nikl	29 Cu měď	30 Zn zinek	31 Ga galium	32 Ge germánie	33 As arsen	34 Se selen	35 Br brom	36 Kr krypton
	5	37 Rb rubidium	38 Sr strontium	39 Y yttrium	40 Zr zirkon	41 Nb niob	42 Mo molibden	43 Tc technetium	44 Ru ruthenium	45 Rh rhodium	46 Pd palladium	47 Ag stříbro	48 Cd kadmium	49 In indium	50 Sn olovo	51 Sb antimon	52 Te télur	53 I jod	54 Xe krypton
	6	55 Cs cezárium	56 Ba baryum	57 La lanthan	72 Hf hafnium	73 Ta tantal	74 W wolfram	75 Re renium	76 Os osmium	77 Ir iridium	78 Pt platina	79 Au zlato	80 Hg rtuť	81 Tl thallium	82 Pb olovo	83 Bi bismut	84 Po polonium	85 At astat	86 Rn radon
	7	87 Fr francium	88 Ra radium	89 Ac aktinium	104 Ku kürchium	105 Ha hassium													
LANTHANOIDY			58 Ce ce	59 Pr praseodym	60 Nd neodym	61 Pm prometium	62 Sm samarium	63 Eu europium	64 Gd gadolinium	65 Tb terbium	66 Dy dysprosium	67 Ho holmium	68 Er er	69 Tm terbium	70 Yb ytterbium	71 Lu lutetium			
AKTINOIDY			90 Th torium	91 Pa protaktinium	92 U uran	93 Np neptunium	94 Pu plutonium	95 Am amerikium	96 Cm kurium	97 Bk berkeleium	98 Cf kalifornium	99 Es einsteinium	100 Fm fermium	101 Md mendelevium	102 No nobelium	103 Lr lawrencium			

Izotopy vodíku

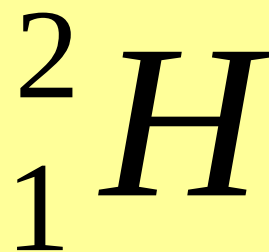


lehký vodík
(protium)

Protium



1 proton

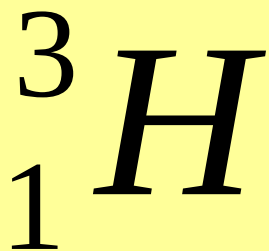


těžký vodík
(deuterium, D)

Deuterium



1 proton
1 neutron



supertěžký vodík
(tritium, T)

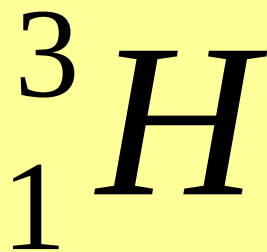
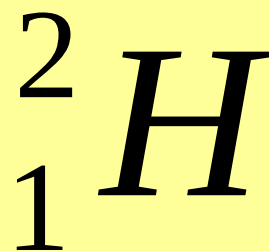
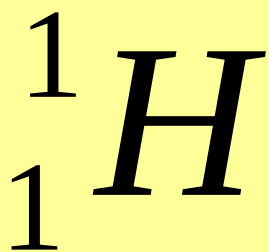
Tritium



1 proton
2 neutrons

Izotopy

- Izotopy mají totožné chemické vlastnosti, liší se však vlastnostmi fyzikálními.



ciferník hodinek osvětlený
radioaktivním tritiem

stabilní jádra

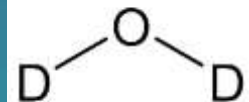
nestabilní jádro
radioaktivní prvek



Izotopy vodíku

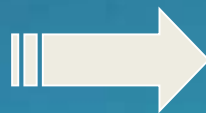
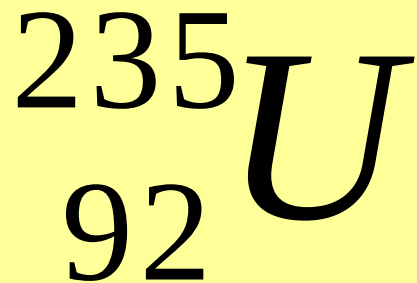
- I lehká voda (H_2O) a těžká voda (D_2O) mají různé vlastnosti.

mírně jedovatá

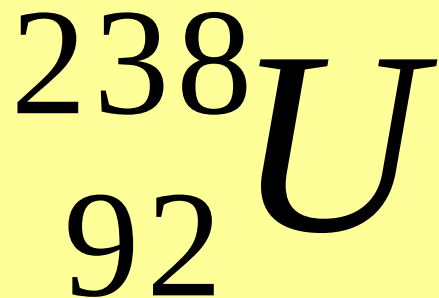


Vlastnost	Těžká voda (D_2O)	Normální voda (H_2O)
Teplota tání	3,82 °C	0 °C
Teplota varu (při normálním tlaku)	101,42 °C	100 °C
Maximální hustota	1,1072 g/cm ³	1,0 g/cm ³
Maximální hustota je při	11,2 °C	3,98 °C
Hodnota pK_w při 25°C	14,869	14,000
pH (při 25 °C)	7,41	7,00

Nejdůležitější izotopy uranu



**Ize použít k výrobě
jaderné zbraně**

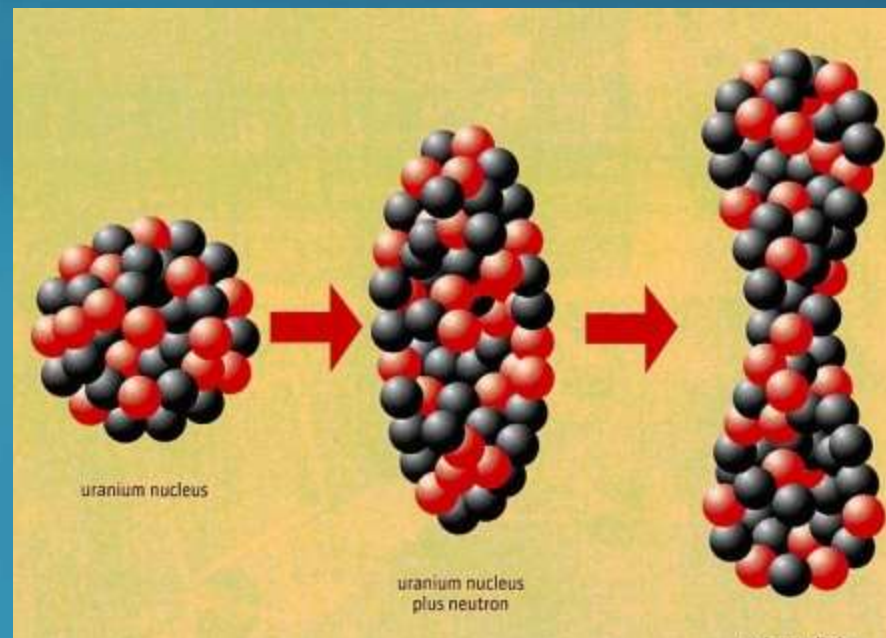
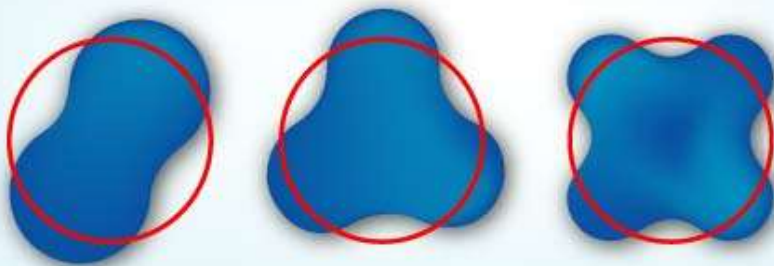


**nelze použít k výrobě
jaderné zbraně**

Kapkový model jádra atomu

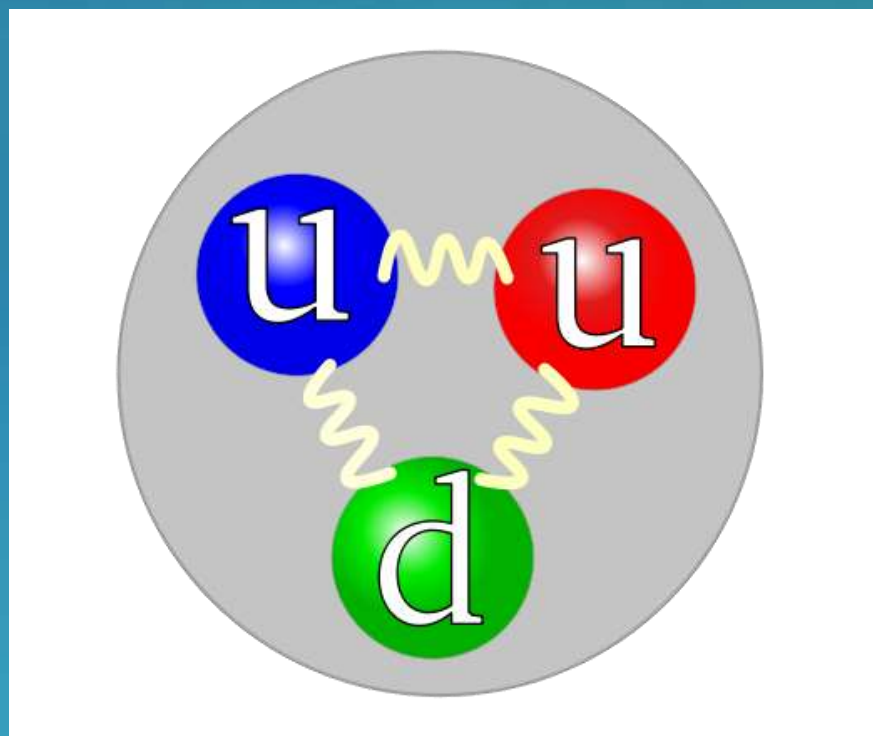
- Podle kapkového modelu se atomové jádro nechová jako tuhé těleso, ale jako kapka jakési kapaliny o nesmírně vysoké hustotě 10^{17} kgm^{-3} .
- Může se tedy různě natahovat, deformovat se, vibrovat a dokonce se i „přetrhnout“.

Vibrační módy jádra podle kapkového modelu



Elementární částice

- Nukleony nejsou elementární částice. Skládají se ze tří kvarků vázaných silnými jadernými silami.
- V současnosti naší představu o elementárních částicích popisuje **Standardní model**.



Standardní model částic

fermiony (polocelý spin)

bosony (celočíselný spin)

leptony

fermionové hadrony
(baryony)

intermediální částice

bosonové hadrony
(mezony)

e, ν_e , kvark u, d

nukleony p, n

graviton
gravitační i.

pion π
kauon K

μ, ν_μ , kvark c, s

hyperony
 $\Lambda, \Sigma, \Xi, \Omega, \dots$

foton
elmag. i.

...

τ, ν_τ , kvark t, b

gluony
silná i.

bosony Z, W
slabá i.

Fermiony

- Částice s polocelým spinem = spin je lichým násobkem $\hbar/2$, $\hbar = h/2\pi$ (spin $\frac{1}{2}$ znamená spin $\hbar/2$)
- Platí pro ně Pauliho vylučovací princip
 - Princip kvantové mechaniky, který říká, že žádné dva nerozlišitelné fermiony nemohou být ve stejném kvantovém stavu.
 - Formuloval v roce 1925 fyzik Wolfgang Pauli. Jedná se o jedno ze základních pravidel fyziky, protože mezi fermiony, pro které pravidlo platí, patří protony, neutrony a elektrony, ze kterých je složena veškerá běžná hmota.
 - Částice, které nejsou fermiony, se nazývají bosony. Mají celočíselný spin a mohou sdílet kvantové stavy.
 - Příkladem aplikace Pauliho vylučovacího principu (a původním motivem pro jeho zavedení) je plnění atomového obalu elektrony: v elektronovém obalu daného atomu může být v konkrétním kvantovém stavu popsáném kvantovými čísly n, l, m, s nejvýše jeden elektron (neboli v daném kvantovém stavu nemohou existovat dva elektrony současně. Každé dva elektrony v obalu se liší v hodnotě alespoň jednoho kvantového čísla).

Fermiony

- Leptony
 - Lehké částice tvořené třemi generacemi (tzv. vůněmi)
 - Každá vůně obsahuje dva kvarky, elektron či jeho variantu a jeden druh neutrina
 - 6 kvarků: u – up, d – down, c – charm, s – strange, t – top, b – bottom
 - 3 varianty elektronů: běžný elektron, mion, tauon
 - 3 druhy neutrin: elektronové, mionové, tauonové
 - Všechny strukturní stavební prvky fyziky se skládají z kombinace leptonů a jejich antičástic
 - Vnitřní struktura leptonů není známa
 - Ke každému leptonu přísluší jeho antičástice

Fermiony

1.generace rok objevení hmotnost (m_u) náboj (e) poločas rozpadu

elektron e	1897	0,00054	-1	stabilní
elektronové neutrino ν_e	1932 1956	$< 10^{-8}$	0	
up – kvark u	1969	0,0047	2/3	
down – kvark d	1969	0,0074	-1/3	

2.generace hmotnost (m_u) náboj (e) poločas rozpadu

mion μ	1936	0,11	-1	$2 \cdot 10^{-6}$ s	$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$
mionové neutrino ν_μ	1962	$< 0,0003$	0		
charm – kvark c	1974	1,6	2/3		
strange – kvark s	1969	0,16	-1/3		

3.generace hmotnost (m_u) náboj (e) poločas rozpadu

tauon τ	1977	1,9	-1	$3 \cdot 10^{-13}$ s	$\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau$
tauonové neutrino ν_τ	1999 1994	$< 0,033$	0		$\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$
top (truth)– kvark t	1994	189	2/3		rozpad na hadrony
bottom (beauty)– kvark b	1976	5,2	-1/3		

Fermiony

- Fermionové hadrony = baryony
- Těžké částice skládající se z kombinace tří kvarků
- Mají vnitřní strukturu
- Nukleony
 - p – kvarkové složení uud
 - Náboj protonu (uud): $q = \frac{2}{3} e + \frac{2}{3} e - \frac{1}{3} e = 1 e$
 - n – kvarkové složení udd
 - Náboj neutronu (udd): $q = \frac{2}{3} e - \frac{1}{3} e - \frac{1}{3} e = 0$
- Hyperony L, W (baryony těžší než nukleony)
 - Obsahují vždy kvark s
 - S poločasem rozpadu $\approx 10^{-8} - 10^{-10}$ s se rozpadají na nukleony

Bosony

- Částice s celočíselným spinem = spin je sudým násobkem $\hbar/2$
- Neplatí pro ně Pauliho vylučovací princip
- Bosony bez známé vnitřní struktury = intermediální částice
- Gravitony, fotony, gluony, intermediální bosony Z a W
- Bosonové hadrony (mezony)
 - Mají vnitřní kvarkovou strukturu
 - Př. mezon π =pion s nábojem $+e$ a s kvarkovým složením ud , kde d je antikvark
- Všechno, co bylo do současnosti fyzikou prozkoumáno jako nositelé vzájemného působení mezi strukturními stavebními prvky fyzikálních objektů je tvořeno bosony

Intermediální částice

- Podle představ kvantové teorie pole probíhá interakce dvou částic tak, že si vymění tzv. intermediální (mezipůsobící, polní, výměnnou) částici
- Každá částice podléhající interakci je obklopena oblakem těchto intermediálních částic. Pojem pole (elektromagnetické, slabé, silné, gravitační) tak neznamená nic jiného než tento oblak intermediálních částic
- Každá elektricky nabitá částice je tedy obklopena fotony (elektromagnetickým polem), každý kvark je obklopen gluony (gluonovým - silným polem). Gluony vytvářejí kolem kvarku jakýsi těžký gluonový kožich, jeho hmotnost dokonce několikanásobně přesahuje hmotnost samotného kvarku

Standardní model částic

- Fyzikální objekty
 - strukturní stavební prvky (fermiony) {látka}
 - nositelé vzájemného působení mezi stavebními prvky = intermediální částice (bosony) {pole}
- Struktury nejnižšího řádu (krátkodosahové)
 - Fundamentální silná interakce
 - Zodpovědná za stabilitu nukleonů - tj. protonů a neutronů
 - Stavebními prvky této struktury jsou ve zjednodušené podobě kvarky, nositeli fundamentální silné interakce pak gluony (8 gluonů). Silná interakce je spojena s působením gluonového pole na tzv. barevný (silný) náboj kvarků.
 - Zbytková silná interakce
 - Zodpovědná za stabilitu jader atomů
 - Stavebními prvky této struktury jsou ve zjednodušené podobě nukleony, nositeli zbytkové silné interakce piony (opět však jde o existenci vzájemného působení mezi kvarky a gluonovým polem).
 - Slabá interakce

Interakce nejnižšího řádu (krátkodosahové)

- Struktury nejnižšího řádu (krátkodosahové)
 - Slabá interakce
 - Zodpovědná nikoliv za stabilitu mikroobjektů, ale za jejich přeměnu
 - Stavebními prvky jsou opět fermiony, nositeli pak intermediální (slabé kalibrační) bosony Z a W (Z^0 , W^+ , W^-)
 - Slabá interakce je spojena s působením na tzv. slabý náboj příslušných stavebních prvků
 - Např. přeměna jaderného nukleonu "neutron" na jaderný nukleon "proton", elektronové antineutrino a elektron známého beta záření

Interakce s neomezeným dosahem

- Elektromagnetická interakce
 - Zodpovědná za stabilitu nejen atomů jako celku, ale také za stabilitu makroobjektů
 - Stavebními prvky jsou konkrétní látkové prvky fyzikálních objektů popsané veličinou "elektrický náboj" (např. protony jader, elektrony obalu atomu, ale i nositelé makronáboje)
 - Nositeli elektromagnetické interakce jsou fotony, které jsou úzce spojeny s elektromagnetickým polem.
- Gravitační interakce
 - Zodpovědná za stabilitu a vývoj makroobjektů i megaobjektů
 - Neuplatňuje se v mikrosvětě
 - Stavebními prvky jsou látkové prvky popsané veličinami "hmotnost" a "energie"
 - Nositeli jsou pak gravitony, které jsou úzce spojeny s gravitačním polem (dosud nedetekované)

Částice a antičástice

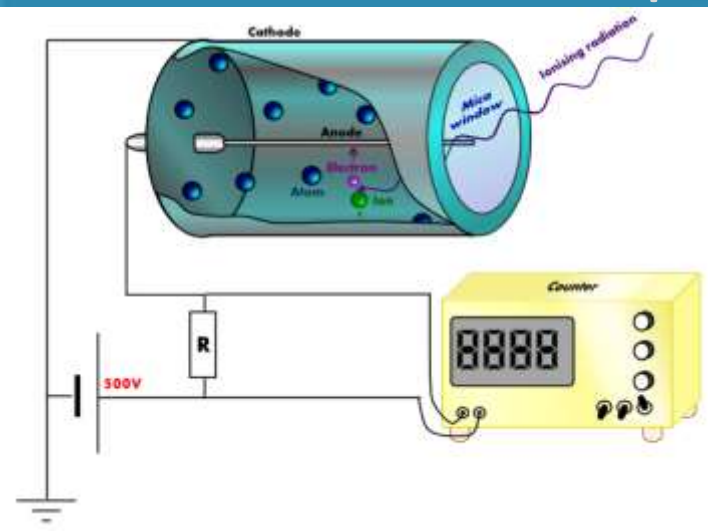
- Ke každé částici existuje antičástice (někdy je identická s částicí), která má stejnou hmotnost, ale opačné hodnoty elektrického náboje a dalších „nábojů“ a čísel
 - Proton p^+ , antiproton p^-
 - Elektron e^- , pozitron e^+
 - Elektronové neutrino ν_e , elektronové antineutrino $\bar{\nu}_e$
 - (obojí elektricky neutrální)
- Při srážce částice se svou antičásticí dochází k anihilaci, částice a antičástice zaniknou a uvolněná energie se vyzáří ve formě dvou fotonů γ letících opačnými směry $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$ $E_\gamma \geq m_e c^2 = 0,511 \text{ MeV}$

Přehled fyzikálních veličin z pohledu vztahu částice a antičástice:

Veličina	částice	antičástice
Hmotnost m	stejná	stejná
Spin (velikost)	stejná	stejná
Doba života τ	stejná	stejná
Izospin (velikost)	stejná	stejná
Elektrický náboj	Q	$-Q$
Magnetický moment	μ	$-\mu$
Baryonové číslo	B	$-B$
Leptonová čísla	L	$-L$
Podivnost	S	$-S$
z složka izospinu I_z	I_z	$-I_z$
Vnitřní parita P	Stejná pro bozony	Opačná - fermiony

Detekce radioaktivního záření

- Radioaktivní záření sice nemůžeme detekovat našimi smysly, můžeme je však zjistit Geigerovým-Müllerovým čítačem
- Geiger-Müllerův počítač – počty reakcí v trubici
- Reakcí plynu v trubici se zářením dochází k jeho ionizaci a průchodu el. proudu.
- Počet ionizací – počet reakcí se zářením.



Detekce radioaktivního záření

- Dále můžeme detekovat radioaktivní záření v různých druzích komor
- Zobrazují trajektorie částic
 - Mlžné
 - Difuzní
- Simulace
- Radioaktivní záření můžeme též zachytit na fotocitlivé materiály

Urychlovače

- Informace o částicích a zejména o protonech, neutronech a bosonech získáváme z jejich vzájemných srážek.
- Detekcí záření vzniklého srážkou dvou částic zjišťujeme jejich složení.
- Pro „rozbití“ částic potřebujeme vysoké energie. Těch dosahujeme na urychlovačích.
- Urychlovače:
 - lineární
 - kruhové
 - [cyklotron](#)
 - Synchrotron ([CERN](#))

Jaderná energie

- Energie nukleonu v jádře nemůže nabývat jakýchkoliv hodnot, ale je kvantována.
- Nukleony jsou tedy na určitých energetických hladinách – slupkách (slupkový model jádra).
- Jestliže jádro vzniká z volných nukleonů, tak se uvolňuje energie, kterou nazýváme jaderná.
- Jádro proto má menší hmotnost než je součet hmotností jeho nukleonů.

Hmotnostní schodek

- Mluvíme o hmotnostním schodku (Δm) jádra.

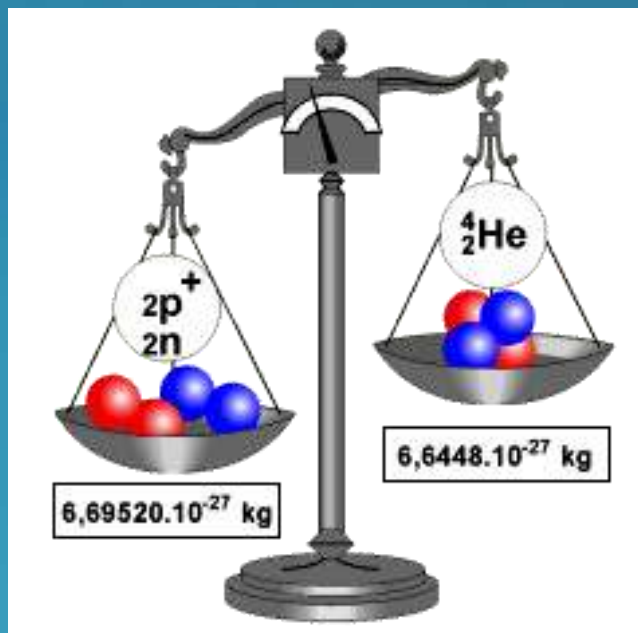
$$\Delta m = m_j - \left(Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n \right)$$

hmotnost
jádra

hmotnost protonů

hmotnost neutronů

- Hmotnostní schodek jádra helia je asi 0,8 %.



Vazebná energie

- Každé jádro má určitou vazebnou energii.
- Dodáme-li jádru vazebnou energii, rozložíme je na jednotlivé volné nukleony.
- Vazebná energie (E_v) souvisí s hmotnostním schodkem tímto Einsteinovým vztahem:

$$E_v = \Delta m \cdot c^2$$

Vazebná energie - poznámka

- Vazebná energie elektronu v atomu vodíku je pouze 13,6 eV a atomů v molekulách jen několik eV.

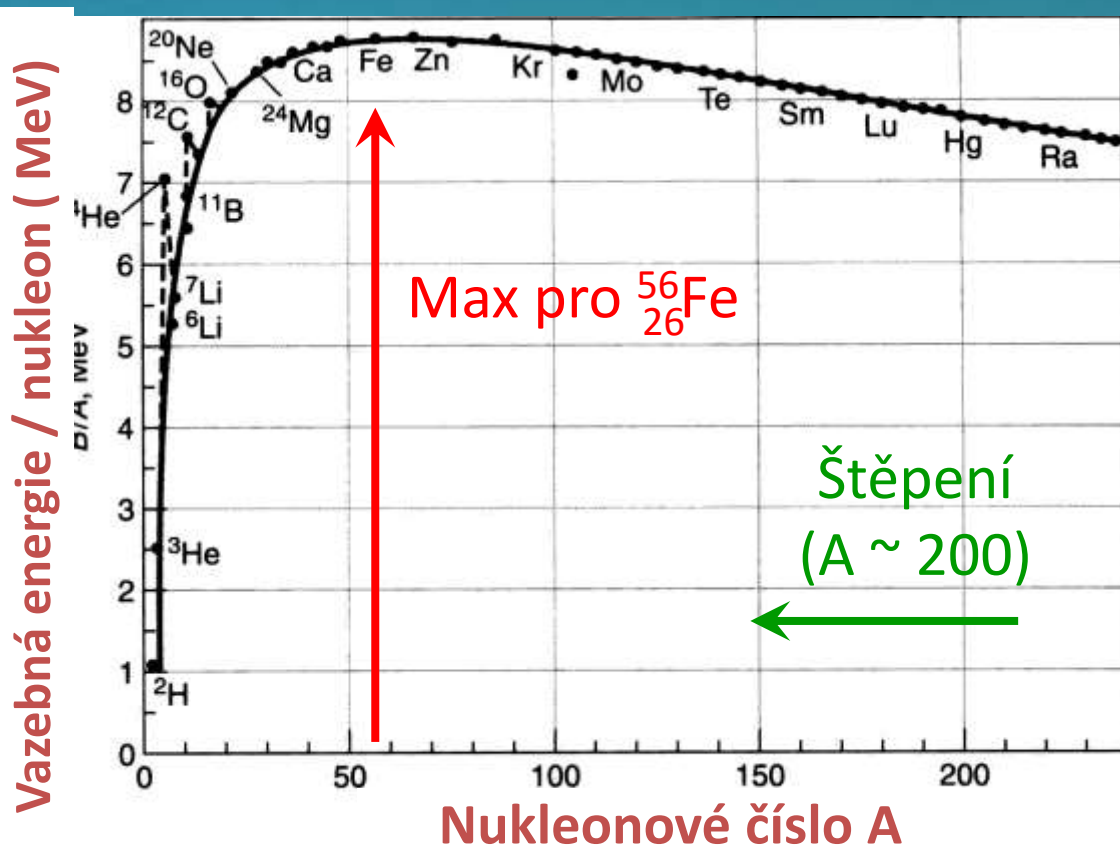


- Vazebné energie jádra se pohybují od 2,22 MeV pro deuterium až po 1800 MeV pro jádra těžká.



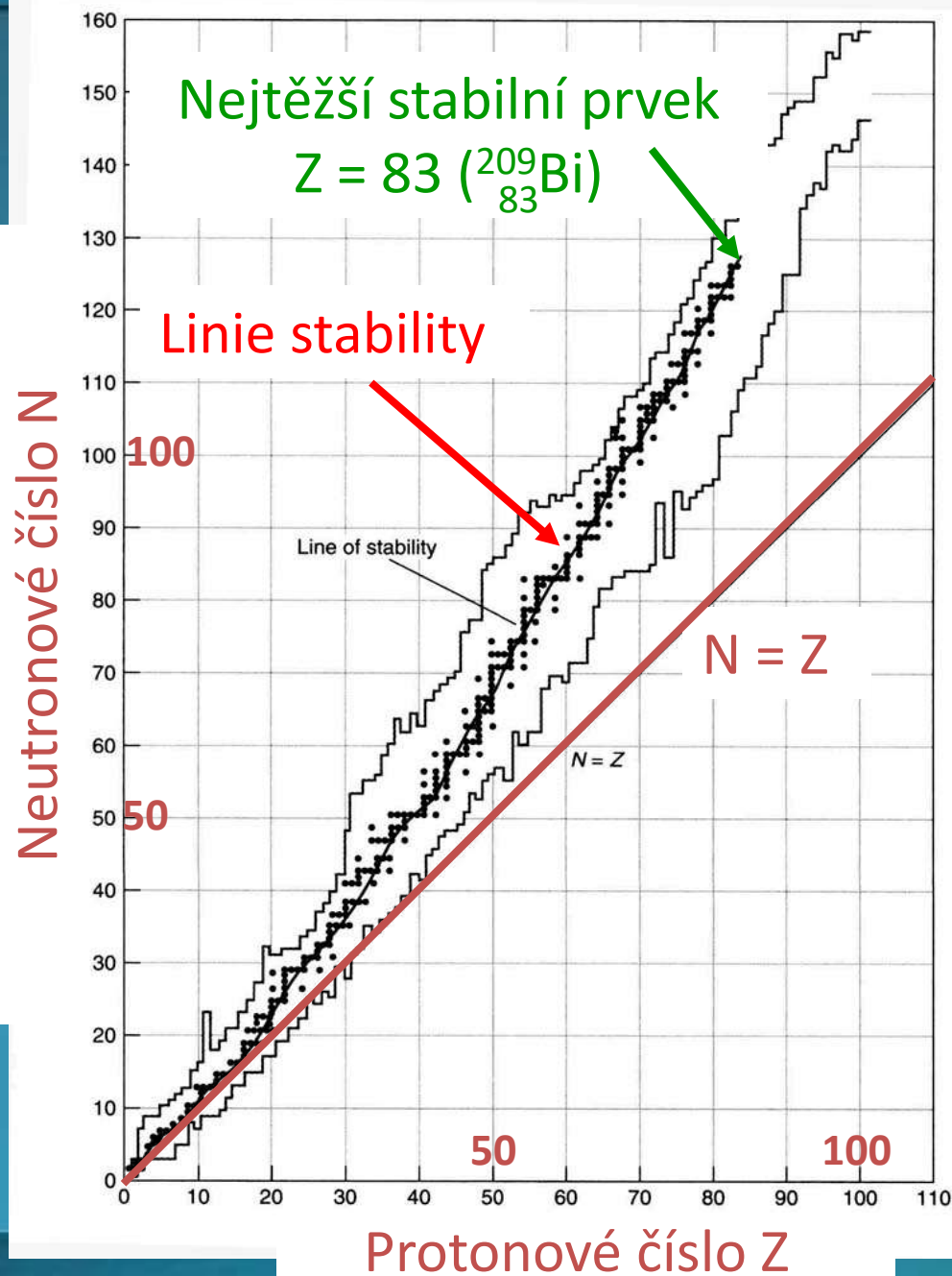
Vazebná energie jádra na jeden nukleon

- Vazebná energie celého atomu roste s nukleonovým číslem, $E_A = E_J \approx A$
- Vazebná energie na jeden nukleon není přesně konstantní
- Nejnižší pro nejlehčí a nejtěžší prvky
- Maximum pro železo
- Výjimečně stabilní ${}^4\text{He}$
- [Simulace](#)



Stabilita izotopů

- 3000 známých jader, pouze 266 stabilních
- $Z > 83 \Rightarrow$ nestabilní izotop
- Linie stability $N \approx Z$ pro lehčí jádra, $N > Z$ pro těžší jádra (elst. odpuzování protonů)



Stabilní a nestabilní izotopy

Vazebná energie na jeden nukleon

- Je patrné, že největší vazebnou energii na jeden nukleon mají jádra střední velikosti ze středu Mendělejevovy tabulky.
- Mezi nimi pak železo, jehož jádro je nejstabilnější.
- Jádra lehká (např. D, He) i jádra těžká (U, Pu) mají vazebnou energii nižší.
- Můžeme z nich tedy získávat energii.

Získání energie z jader

- Děje se to dvěma způsoby:
- slučováním jader lehkých na jádra těžší – (syntéza)
- štěpením jader těžkých na jádra lehčí
- Železo pak představuje jakýsi „jaderný popel“, z něhož již žádnou energii nezískáme.



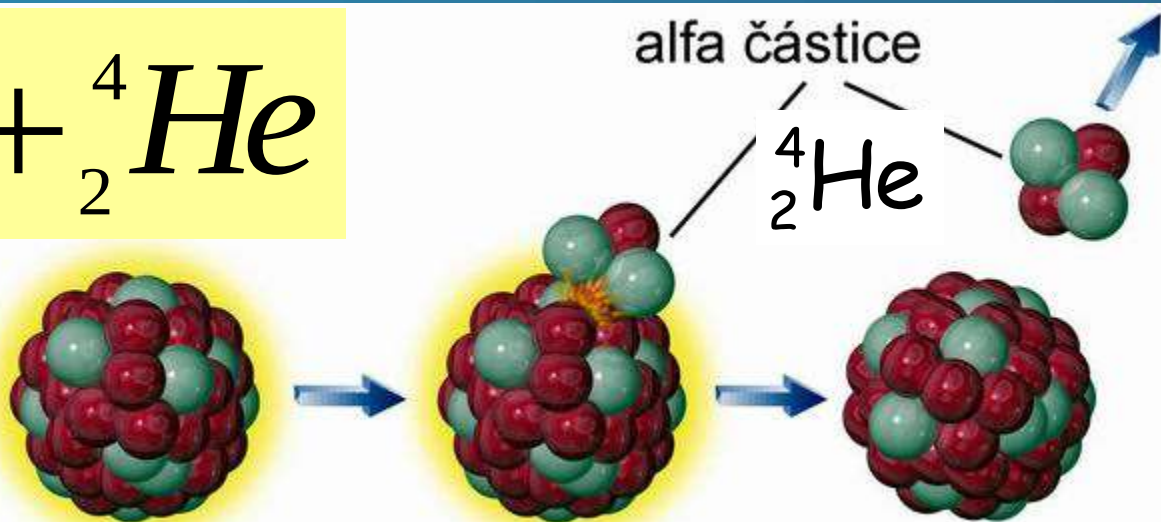
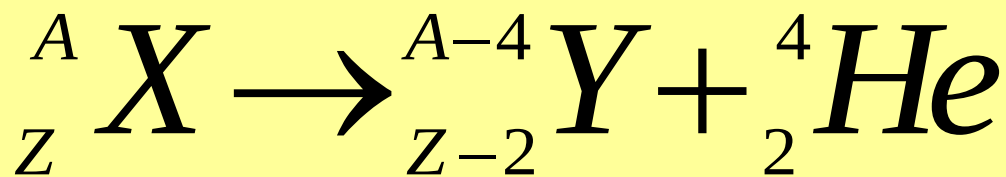
Radioaktivní záření

Radioaktivita

- Atomová jádra mohou být:
 - stabilní
 - nestabilní
- Zatímco **stabilní** jádra mohou existovat v nezměněném stavu neomezeně dlouho, **nestabilní** jádra emitují jistou lehkou částici, čímž se mění na jádra jiná.
- Proud těchto částic pak detekujeme jako radioaktivní záření a jev nazýváme **přirozenou radioaktivitou**. Podle druhu emitované částice pak radioaktivní záření dělíme na:

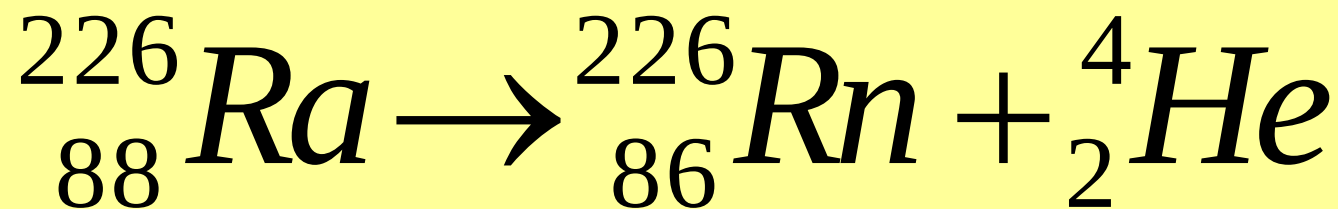
Záření α (alfa)

- Jedná se o proud tzv. α - částic neboli jader helia.
- Protože si α -částice odnáší dva protony, mění se α -zářič (X) v prvek (Y) ležící v periodické tabulce o dvě místa vlevo.
- [Simulace](#)



Záření α (alfa)

- Záření α není příliš pronikavé, neboť jej pohltí již list papíru. α zářič by tak mohl být zdraví nebezpečný, kdyby byl spolknut anebo vdechnut.



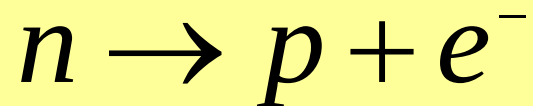
záření β (beta)

- Existuje ve dvou formách:

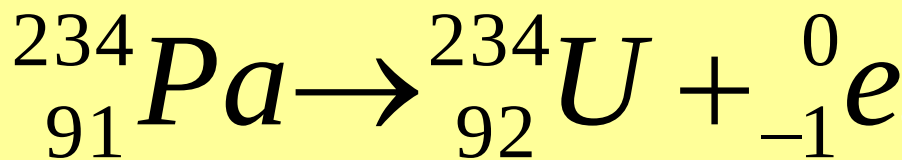
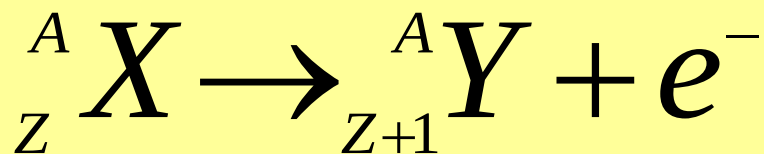
- β^- (beta minus)

- Jedná se o proud elektronů (e^-), vznikajících v jádře při přeměně neutronu v proton.

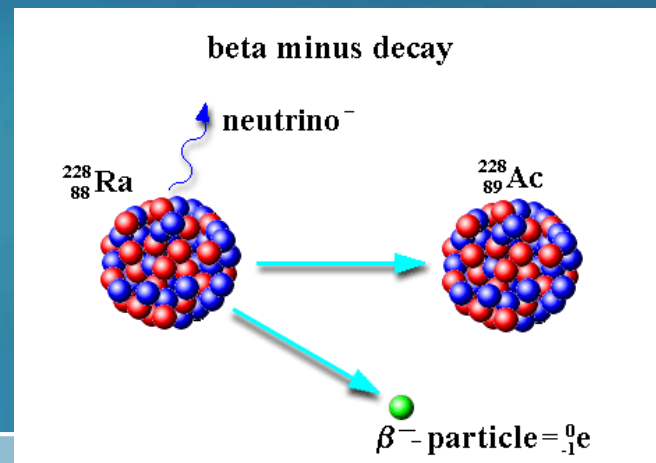
- Protože se při β^- rozpadu mění neutron na proton, mění se β^- zářič (X) na prvek (Y) stojící v periodické tabulce o jedno místo vpravo.



- Simulace

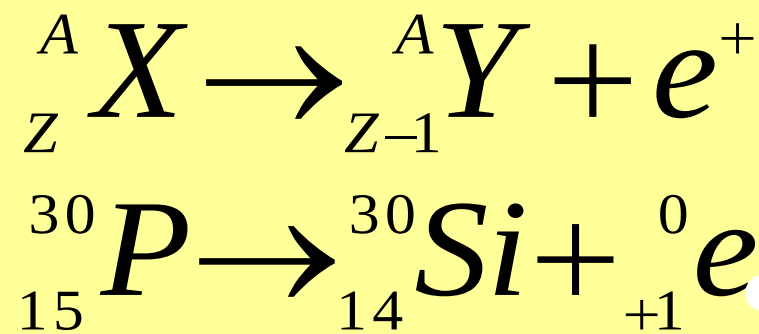


e^- neboli elektron

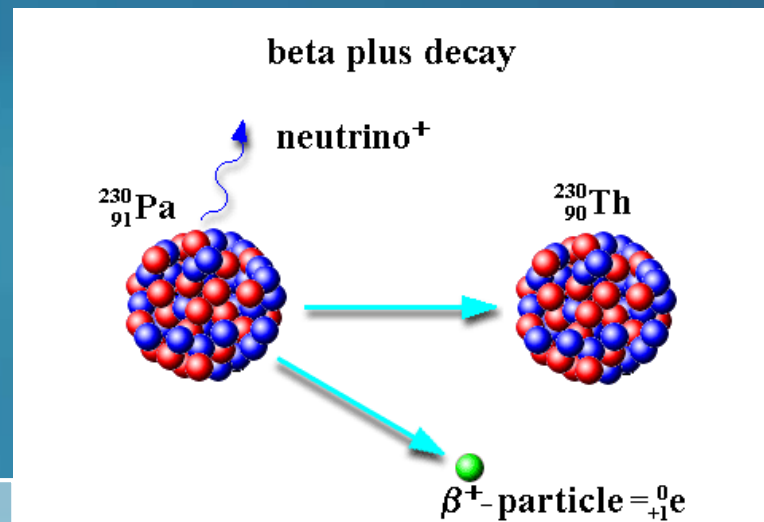


β^+ (beta plus)

- Jedná se o proud pozitronů (e^+), vznikajících v jádře při přeměně protonu v neutron. $p \rightarrow n + e^+$
- Protože se při β^+ rozpadu mění proton na neutron, mění se β^+ zářič (X) na prvek (Y) stojící v periodické tabulce o jedno místo vlevo.
- Beta záření je pronikavější než záření alfa. Pohltí jej však již tenká hliníková fólie.

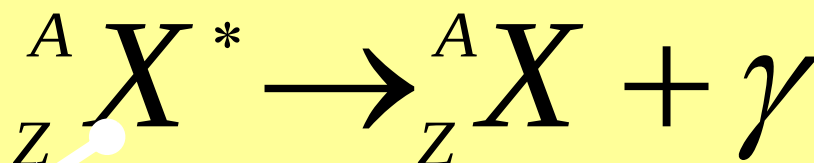


pozitron (e^+), tj. antičástice k elektronu,

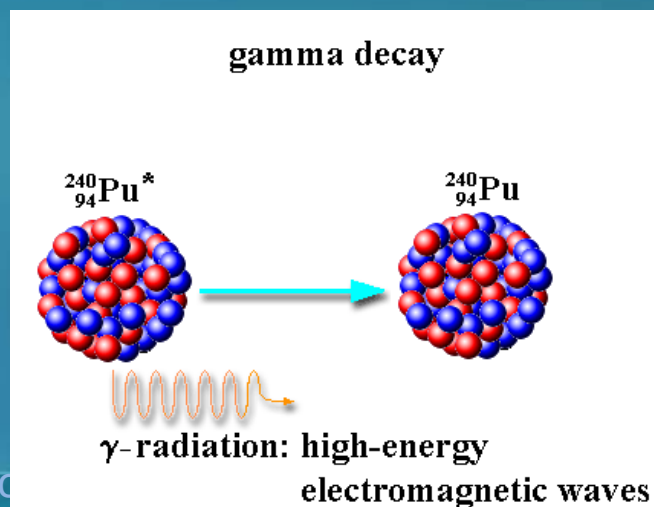


záření γ (gama)

- Jedná se o proud γ fotonů, vznikajících v jádře při přechodu nukleonu z vyšší energetické hladiny na hladinu nižší.
- Vyzářením γ fotonu se jádro „zbaví“ energie, ale jinak se nezmění.
- Gama záření je velmi krátkovlnné, vysoce energetické (tzv. tvrdé) elektromagnetické záření.



jádro v excitovaném stavu

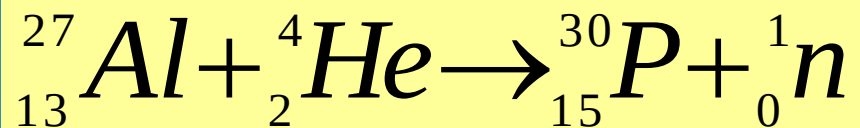


záření γ (gama)

- Účinnou ochranu před ním pak poskytují pouze silné vrstvy materiálu o vysoké atomové hmotnosti a hustotě jako je olovo, ocel anebo beton.

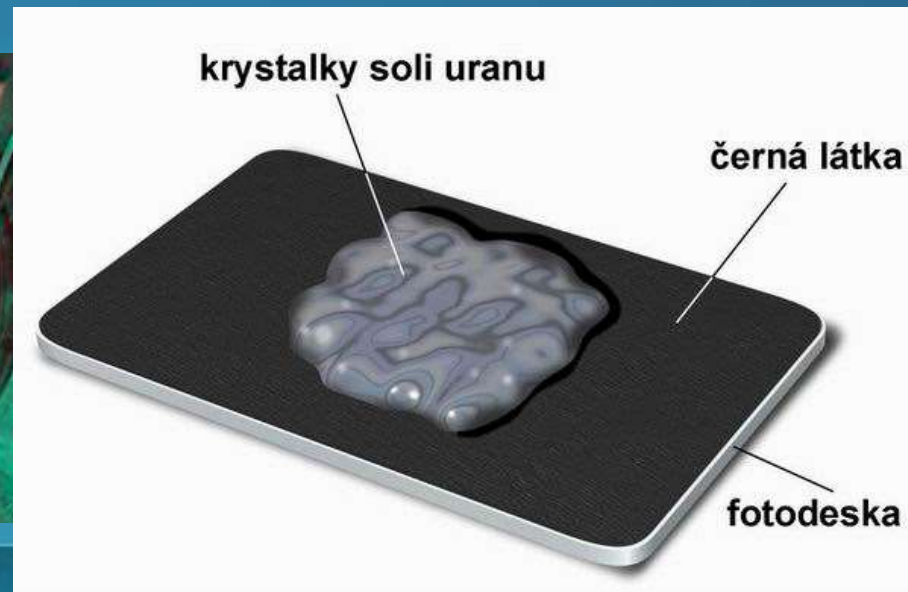
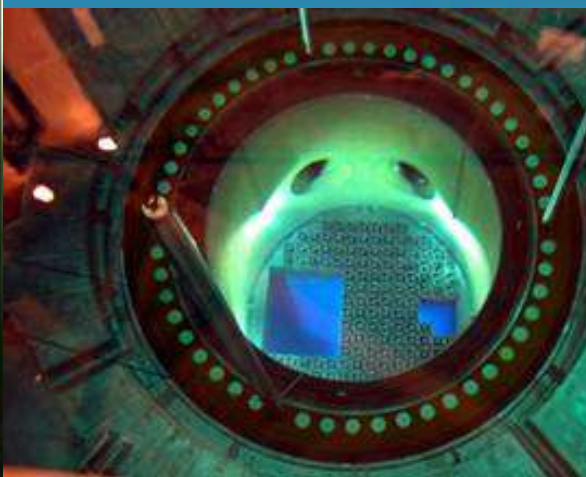
Neutronové záření

- Je tvořeno proudem neutronů vznikajících při jistých jaderných reakcích, např. při štěpení jader uranu.
- Protože neutrony nemají žádný elektrický náboj, slabě interagují s hmotou.
- Neutronové záření je tedy značně pronikavé a tedy nebezpečné.
- Dobře se pohlcuje pouze v materiálech s nízkou atomovou hmotností (tj. obsahujících značné množství lehkých prvků jako vodíku, uhlíku aj.)



Vlastnosti radioaktivního záření:

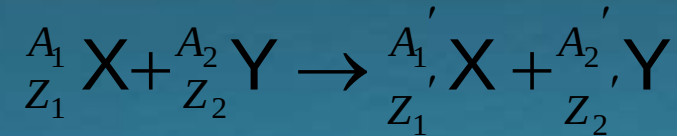
- ionizační
(štěpí neutrální molekuly vzduchu na ionty)
- světelné
(látky při jeho průchodu světélkují)
- chemické
(exponuje fotografické materiály)



Pro všechny jaderné reakce platí:

- Zákony zachování

- Počtu nukleonů



$$A_1 + A_2 = A_1' + A_2'$$

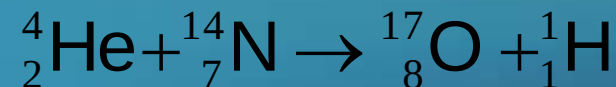
- Elektrického náboje

$$Z_1 + Z_2 = Z_1' + Z_2'$$

- Protonové číslo se nezachovává, pokud dochází k přeměně mezi protonem a neutronem, jinak ano

- Zachovává se pseudoprotonové číslo, které vychází z náboje elementárních částic $\Rightarrow$ zachování náboje

- Energie



- Hybnosti

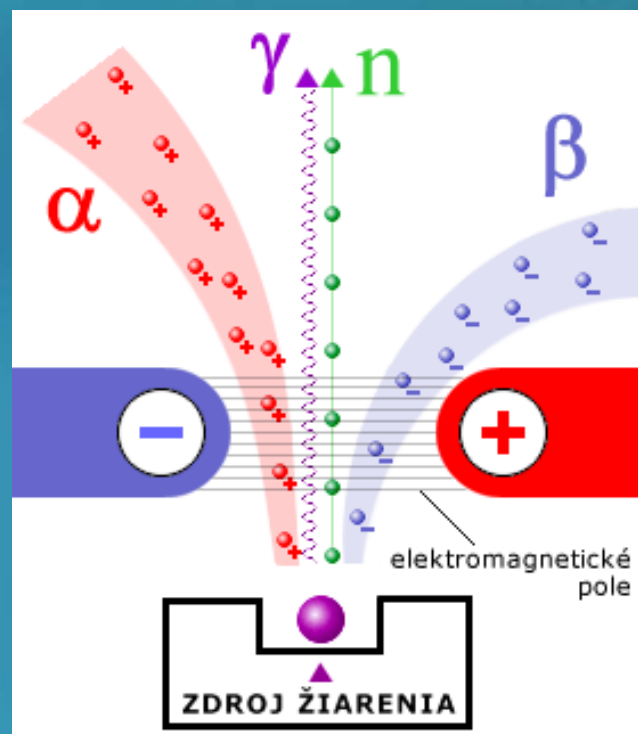


- Momentu hybnosti



Vlastnosti radioaktivního záření:

- biologické
(poškozuje a ničí živé buňky, vyvolává mutace)
- trajektorie nabitých částic se v elektrickém či magnetickém poli zakřivují (mlžná komora)



Přeměnový zákon

- Jádra radioaktivního prvku se tedy samovolně mění na jádra prvku jiného.
- Přeměnový zákon pak říká, že po uplynutí určité doby T (poločasu přeměny/rozpadu) se přemění právě polovina jader.
- [Simulace](#)

Přeměnový zákon

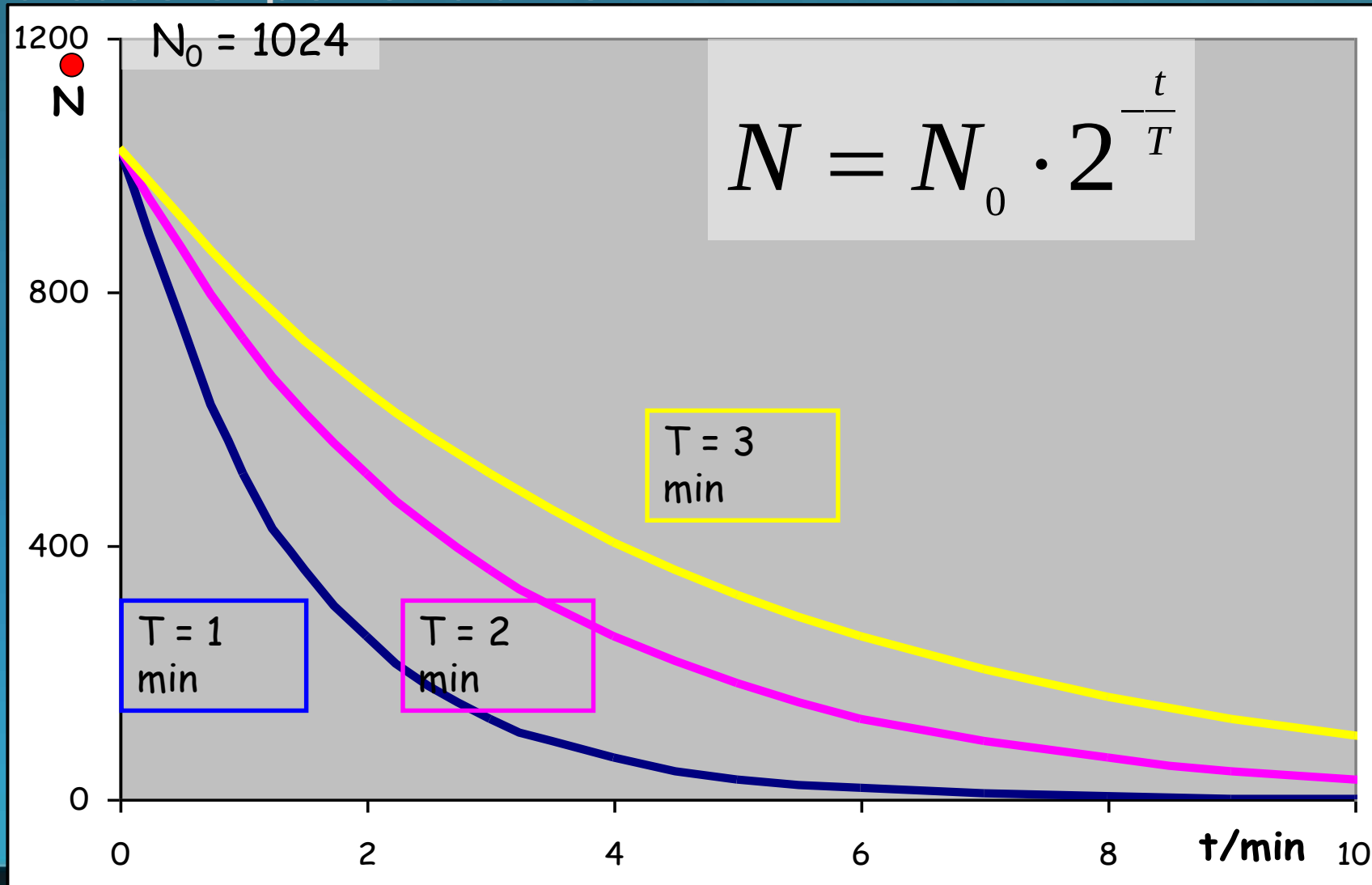
- přeměnový zákon pro $T = 1$ min

čas	t/min	N	N/N ₀	počet nepřeměněných jader
	0	512	1	N ₀ ... počet jader na počátku přeměny
	1	256	$\frac{1}{2}$	
	2	128	$\frac{1}{4}$	
	3	64	$\frac{1}{8}$	
	4	32	$\frac{1}{16}$	
	5	16	$\frac{1}{32}$	
	6	8	$\frac{1}{64}$	

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$$

Závislost počtu nepřeměněných částic (N) na čase (t):

- Počet nepřeměněných jader tedy klesá v závislosti na čase exponenciálně:

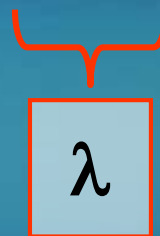


Přeměnový zákon

- Rovnici pak mohu upravovat takto:

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}} = N_0 \cdot e^{\ln 2 \cdot \frac{-t}{T}}$$

$$= N_0 \cdot e^{-\frac{t}{T} \ln 2} = N_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T} t}$$


$$\lambda$$

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

přeměnová konstanta, $[\lambda] = \text{s}^{-1}$

Poločas přeměny některých izotopů

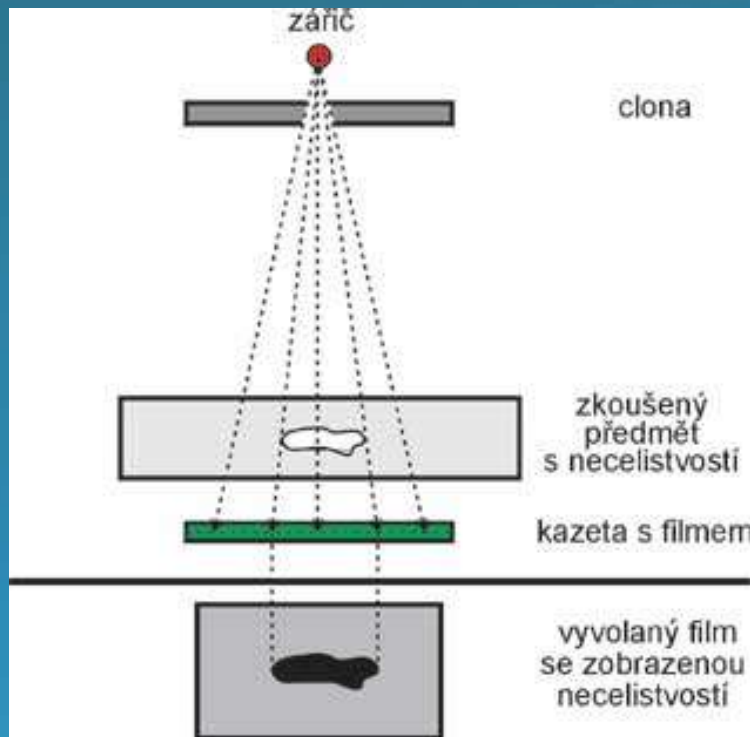
Izotop	poločas přeměny	Izotop	poločas přeměny
²⁰⁹ Bi	cca $1,9 \cdot 10^{19}$ let	³ H	12,36 let
²³² Th	14,05 miliardy let	³⁵ S	87,5 dní
²³⁸ U	4,468 miliardy let	²²² Rn	3,8 dní
²³⁹ Pu	24110 let	²²³ Fr	22 minut
¹⁴ C	5730 let	²²³ Th	0,9 sekundy
²²⁶ Ra	1622 let	²¹² Po	0,3 μ s
¹³⁷ Cs	30 let	⁸ Be	$6,7 \cdot 10^{-17}$ s

- Z poločasu rozpadu $T_{1/2}$ lze odvodit přeměnovou konstantu λ i střední dobu života τ :

$$T_{1/2} = \tau \cdot \ln 2 = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln 2$$

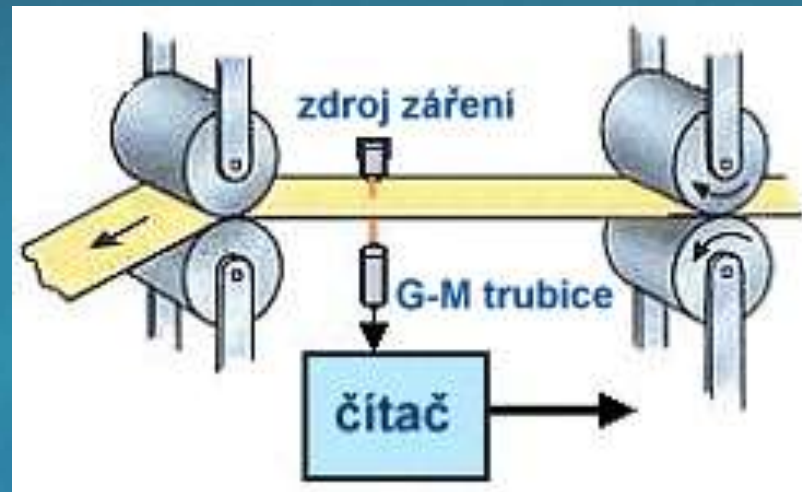
Využití radioaktivního záření:

- průmyslová defektoskopie (zkouška prozářením)



Využití radioaktivního záření:

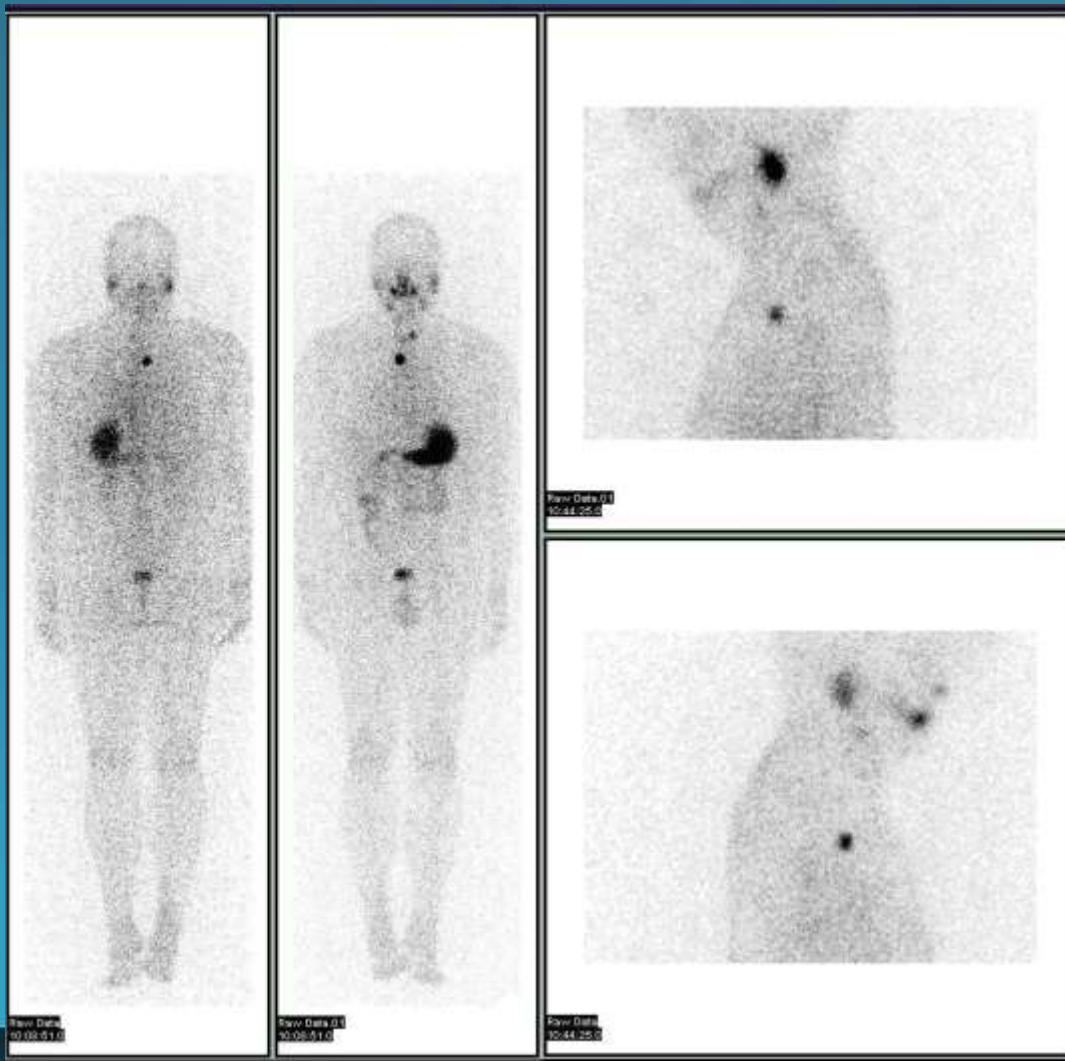
- měření tloušťky materiálu



- stopovací metody (např. zjišťování úniků kapalin a netěsností potrubí)

Využití radioaktivního záření:

- diagnostické metody v medicíně (metoda značených atomů)



Využití radioaktivního záření:

- radiofarmaka (zářič vkládáme přímo do nádoru)



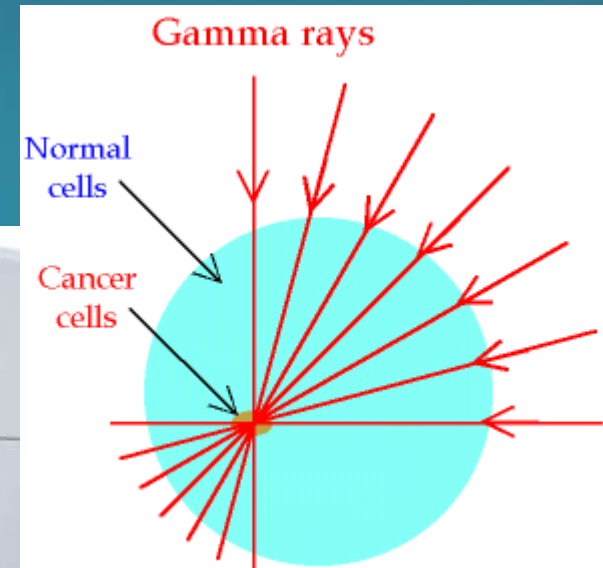
Využití radioaktivního záření:

- radioterapie (ozařování nádorů)



Využití radioaktivního záření:

- radiochirurgie (Leksellův gama nůž)



Využití radioaktivního záření:

- sterilizace materiálu
- šlechtitelství, ochrana skladovaných potravin
- archeologie (radiokarbonová metoda)



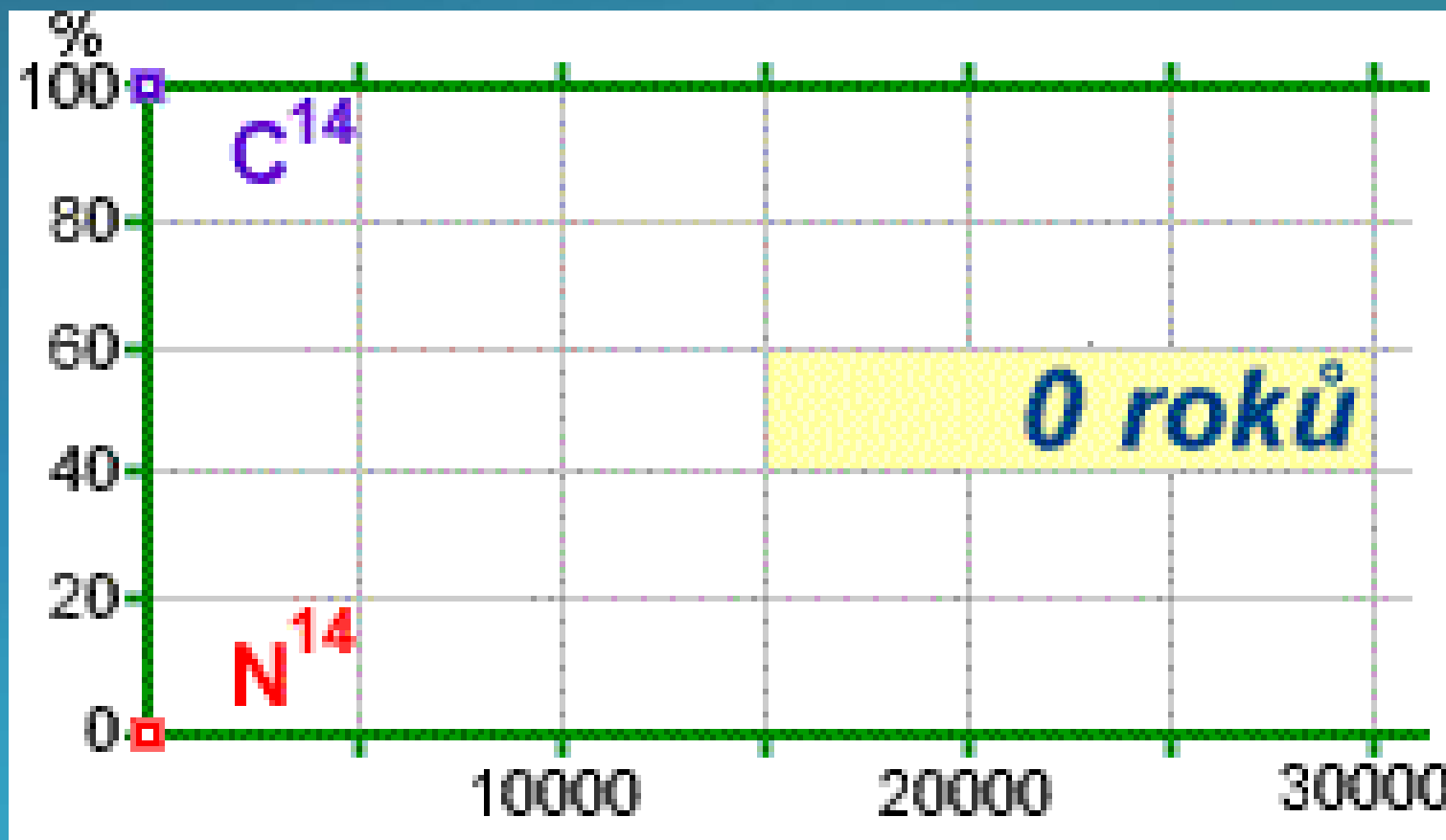
**Ötzi, muž z ledovce, †
3300 př. n. l.**

Radiokarbonová metoda

- Živý organismus obsahuje určité konstantní množství radioaktivního uhlíku C^{14} , který vzniká v atmosféře účinkem kosmického záření. Tento uhlík C^{14} se mění na dusík N^{14} s poločasem rozpadu 5730 let.
- Pokud organismus zemře, přestane být zvnějšku doplňován a tudíž jeho koncentrace klesá.

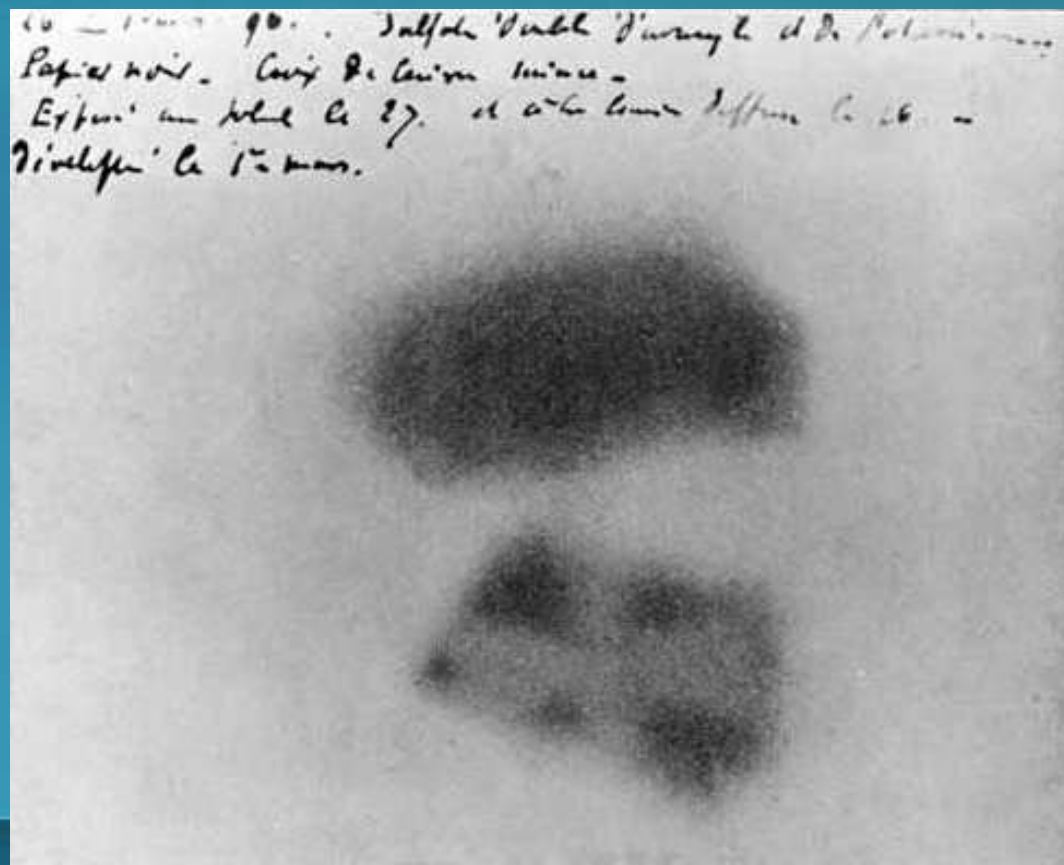
Radiokarbonová metoda

- Určíme-li množství zbývajícího C^{14} , vypočteme, kdy ke smrti došlo.
- Simulace



Objev radioaktivity

- Roku 1896 objevil radioaktivitu při experimentech se solemi uranu Henri Becquerel.
 - Becquerelova fotografická deska exponovaná radioaktivním zářením



- Největší zásluhy na pochopení podstaty radioaktivního záření má:



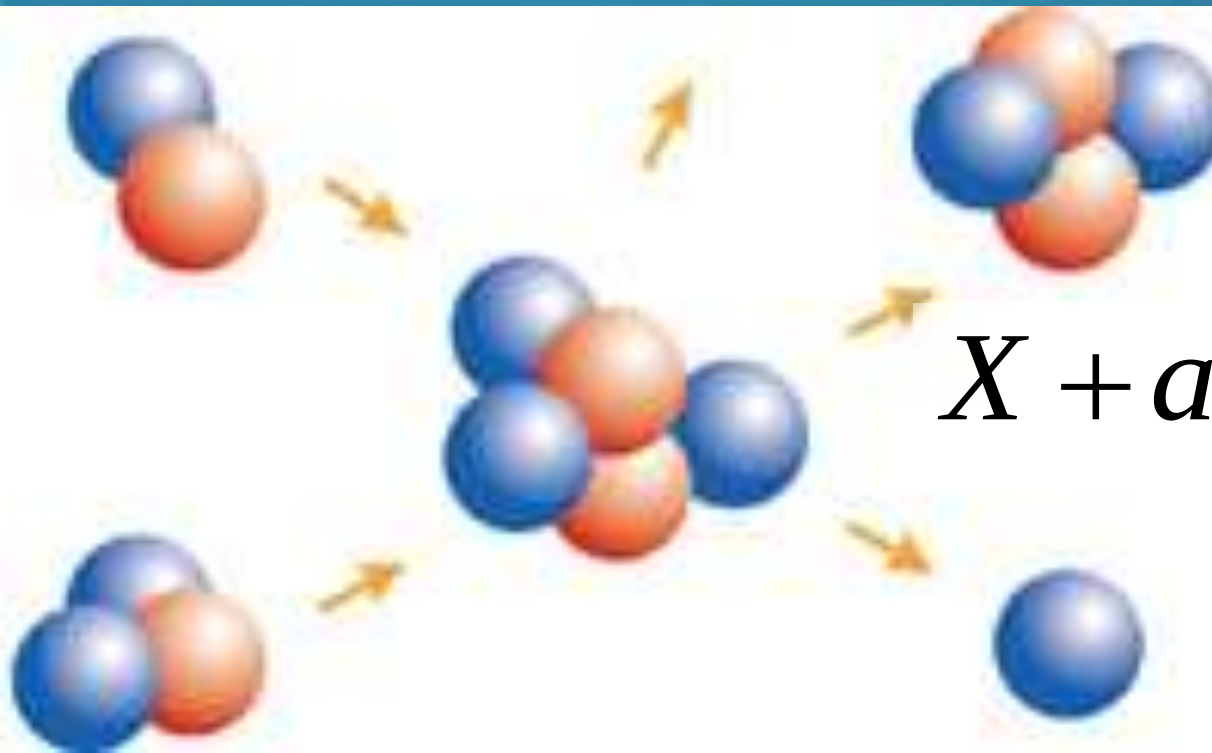
Marie Curie-Skłodowska
07.11. 1867 – 04.07. 1934
vědkyně polského původu

Jaderné reakce



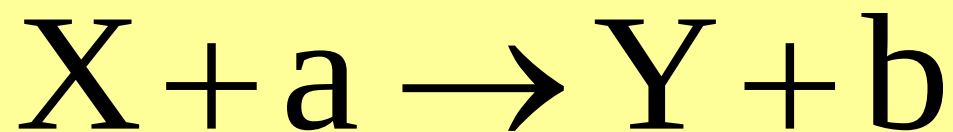
Jaderné reakce

- Srazí-li se jádro (X) s jiným lehkým jádrem anebo částicí (a), oba objekty se spojí a vytvoří nestabilní jádro (Z).
- Jeho rozpadem pak vznikne finální jádro Y a částice (b).



Jaderné reakce

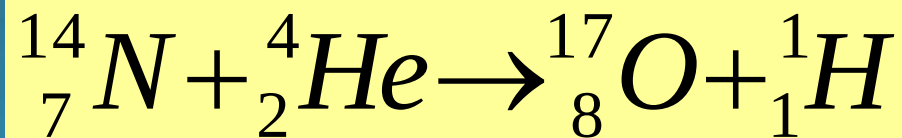
- Došlo k jaderné reakci, při níž se jeden prvek změnil v prvek druhý (transmutace). Obvykle ji zapisujeme takto:



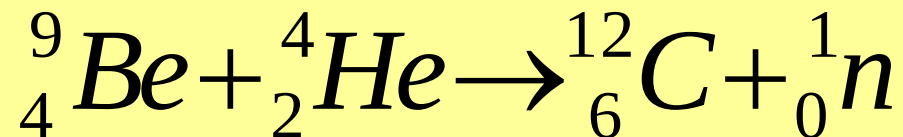
- Jádra vzniklá jadernými reakcemi mohou být stabilní i nestabilní.
- Materiál vystavený radioaktivnímu záření se tak sám může stát radioaktivním. Mluvíme o umělé radioaktivitě.

Jaderné reakce

- První jadernou reakci uskutečnil E. Rutherford, když roku 1919 ostřeloval jádra dusíku částicemi alfa:



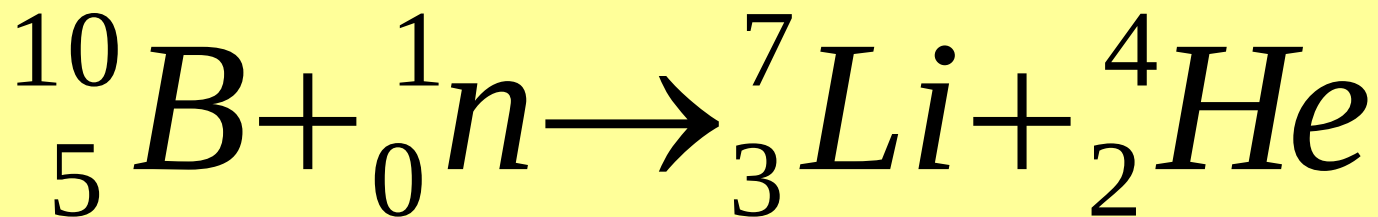
- Roku 1932 britský fyzik J. Chadwick objevil neutron:



Zákony zachování

- Při jaderných reakcích platí všechny zákony zachování; kromě nich se zachovává i protonové a nukleonové číslo.

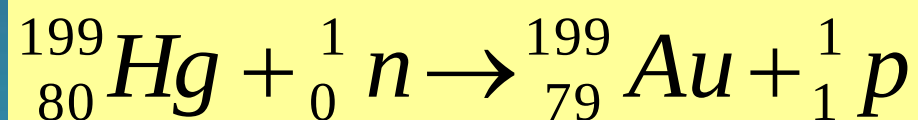
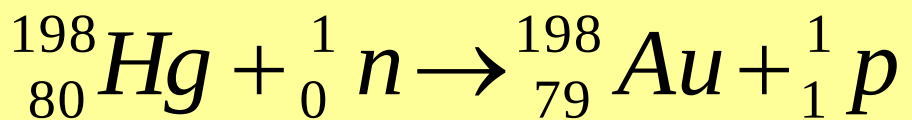
$$10 + 1 = 7 + 4$$



$$5 + 0 = 3 + 2$$

Jaderné reakce

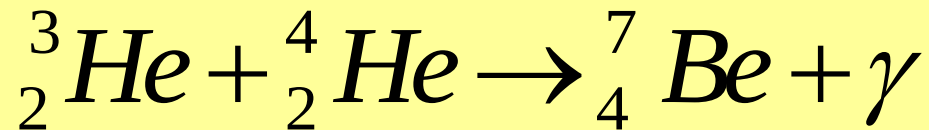
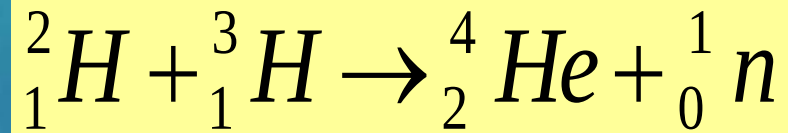
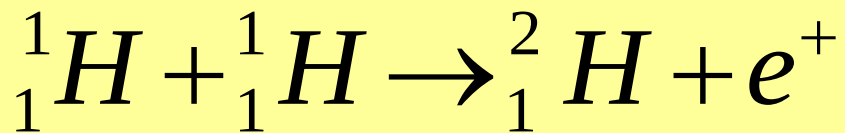
- Ale výroba zlata ze rtuti (1941), jak o tom snili alchymisté, by asi nebyla ekonomická.



- Obdobná přeměna bizmutu na zlato byla provedena na urychlovači v Berkeley roku 1980. Náklady na pokus činily 10 000 dolarů, zisk ve zlatě jednu stomiliardtinu dolaru. Tudy asi cesta nevede.
 - Všechno zlato, vytěžené za celou historii lidstva, váží přes 200 000 tun. Hrana z něho vytvořené krychle by nepřesáhla 22 m. Vešla by se tedy pod oblouk pařížské Eiffelovy věže.

Jaderné reakce - syntéza

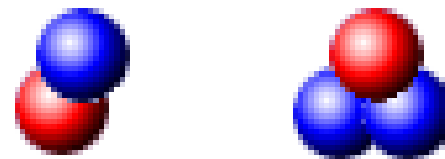
- Důležité jsou reakce, při kterých se uvolňuje energie.
- Jak už víme, energii můžeme získat slučováním lehkých jader, např.:



- Jestliže se mají jádra spojit, musí mít obrovskou rychlost – jen tak se přiblíží na tak malou vzdálenost (10^{-15} m), že přitažlivé síly jaderné překonají odpudivé síly elektrostatické.

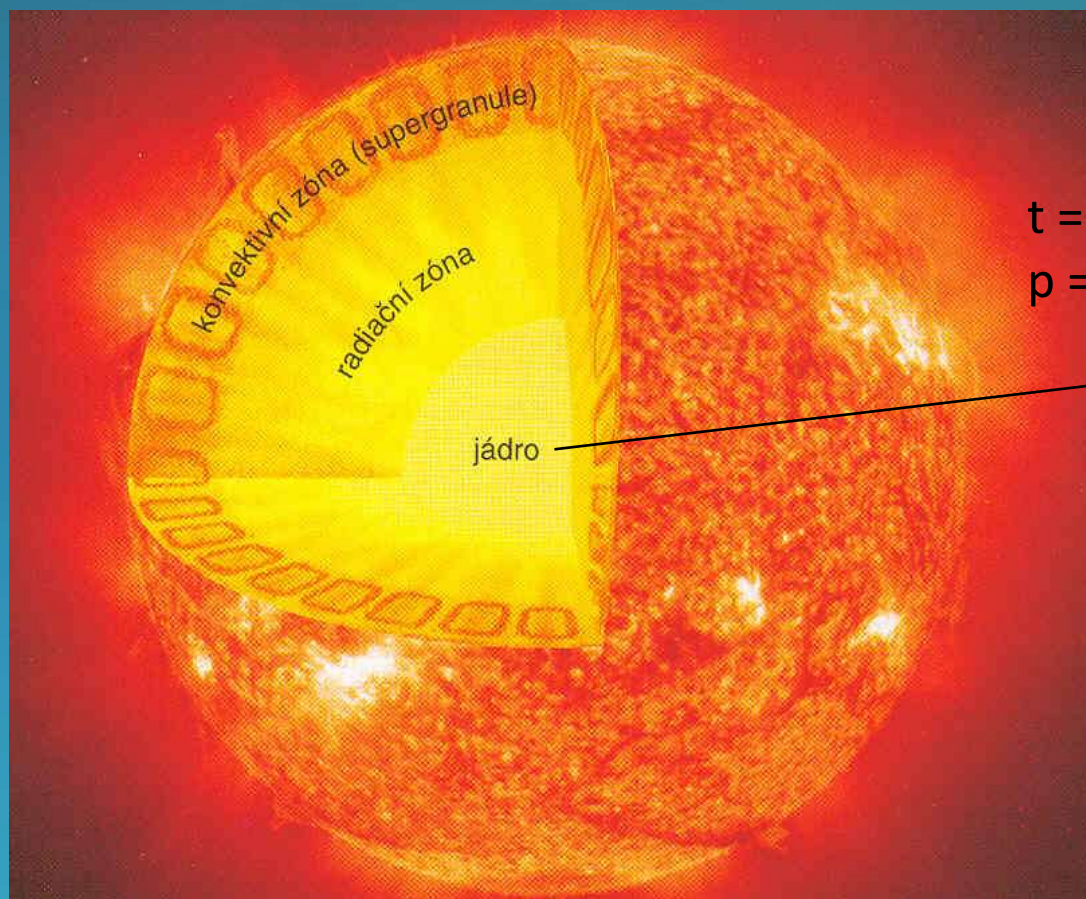
Syntéza jader

- Látku je tedy nutno zahřát na teploty cca 10^8 K. Látka je ve formě plazmy, což je „směs“ volných elektronů a „holých“ jader.
- Mluvíme o termonukleárních reakcích či termojaderné fúzi.
- [Simulace](#)



Energie jaderné fúze

- K těmto reakcím dochází v nitrech hvězd. Jsou zdrojem jejich energie.



$$t = 15 \cdot 10^6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$p = 4 \cdot 10^{10} \text{ MPa}$$

Termojaderná fúze v jádru Slunce

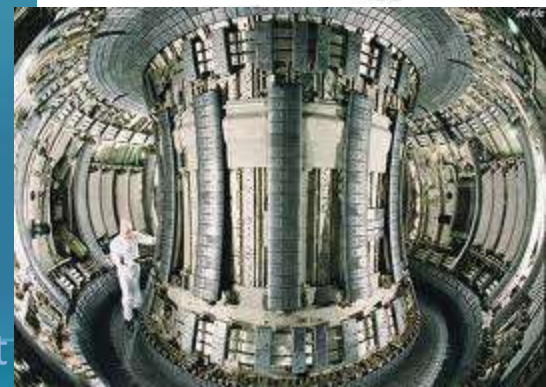
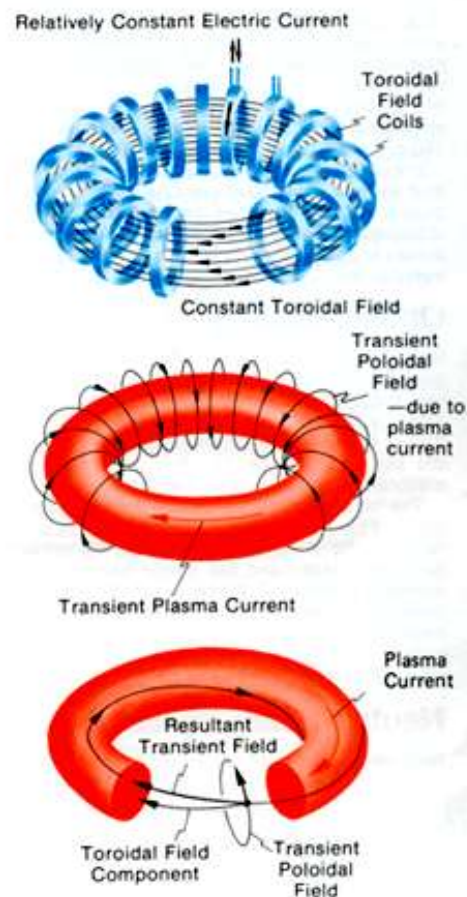
- Slunce vyzařuje výkon $3,9 \times 10^{26}$ Wattů.
- Teplota ve středu Slunce dosahuje $1,5 \times 10^7$ Kelvinů. Z toho lze vypočítat, že kinetická teplota (střední kinetická energie) je 1.3 keV a to není dostatečné k fúzi protonů, ke které je potřeba cca 400 keV.
- Slunce ale přesto vyzařuje energii vzniklou z termojaderné fúze.
 - Vysvětlením je, že rychlost protonů v protonovém plynu se řídí Maxwellovým rozdělovacím zákonem a tak některé protony mohou mít až o dva i o tři řády vyšší rychlost než je rychlost nejpravděpodobnější.
 - Druhým důvodem je, že i když kinetická energie protonů nižší než výška potenciálové bariéry, mohou ji překonávat pomocí kvantového tunelového jevu.

Termojaderná fúze

- Termojaderná fúze je proces, při kterém se slučují lehčí jádra, vznikají jádra těžší a uvolňuje se energie.
- K jejímu dosažení je nutné, aby se reagující jádra přiblížila vzájemně natolik, že převládne jaderná síla přitažlivá nad elektrickou silou odpudivou. V pozemských podmínkách je z hlediska energetického využití nejvhodnější reakce deuteria a tritia (těžký a supertěžký izotop vodíku). Při této reakci vzniká helium a neutron.
- Výše zmíněná reakce je nejvhodnější zejména z důvodu nejnižší potřebné "zápalné" teploty ze všech fúzních reakcí. Jedná se o teplotu "pouze" 100 až 200 miliónů K.
- První podmínkou zvládnutí řízené termojaderné fúze je dosažení této teploty. Jakýkoliv materiál je při takto vysoké teplotě ve stavu plazmatu.
- Z toho vyplývá druhá podmínka pro úspěšné zvládnutí řízené termojaderné fúze- zabránit dotyku horkého plazmatu a stěny komory.

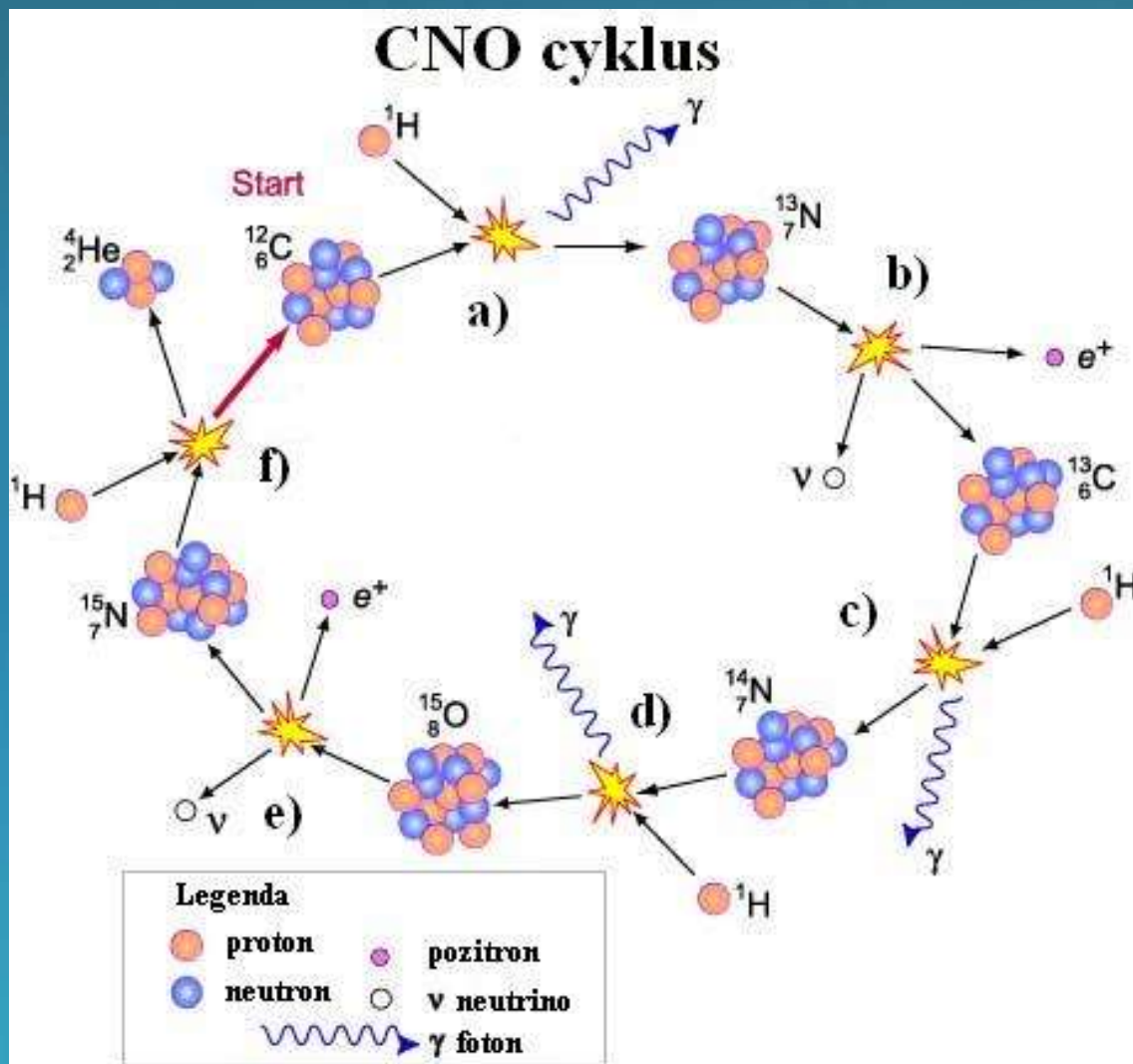
Tokamak

- Tokamak je zařízení, které zabraňuje dotyku plazmatu a stěny komory pomocí magnetického pole.
- Jeho základní částí je komora ve tvaru prstence, která je obklopena cívkami magnetického pole. Tyto cívky vytvoří v komoře velmi silné magnetické pole (několik T), které udržuje plazma.
- Siločáry vytvářeného magnetického pole se do sebe uzavírají v reakční komoře. Elektricky nabitá částice se pohybuje podél magnetické siločáry. Právě proto by měly částice plazmatu zůstat v komoře izolované od stěny. Různé nestability a difúze částic napříč magnetickým polem výrazným způsobem zhoršují udržení plazmatu.
- Stavěný tokamak ITER bude používat vodíkový plazmový prstenec zahřátý na 100 milionů °C.
 - Podle návrhu by měl být schopen vyrábět z půlgramové směsi deuteria s tritiem asi 500 MW fúzní energie po dobu až 1 000 sekund.
 - Tohoto výkonu by měl dosáhnout při příkonu 50 MW, čímž by se stal prvním tokamakem, který z paliva získá více energie, než sám spotřebuje na udržení plazmatu.



Jaderná syntéza

- Syntetizují se při nich prvky až po železo.

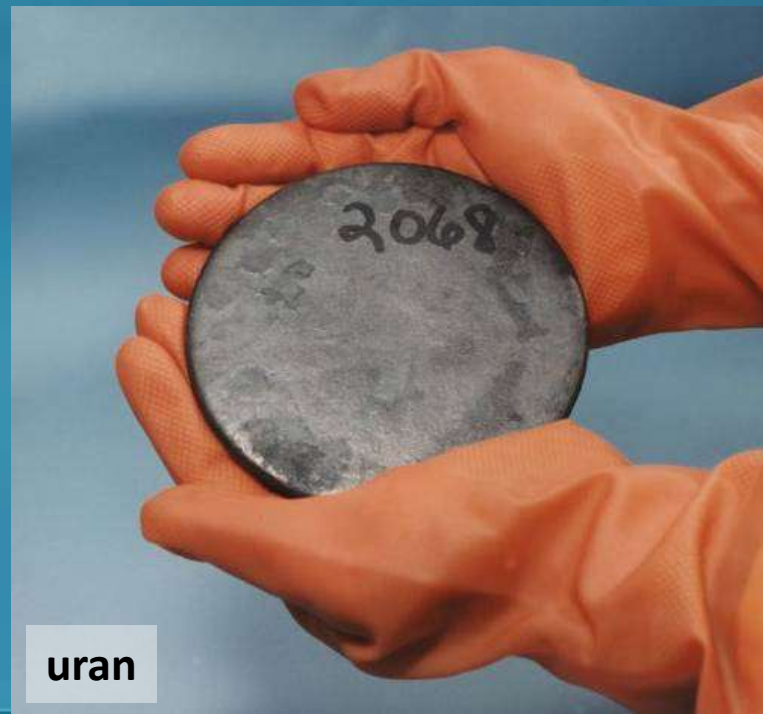


Jaderné štěpení

- Energii však můžeme získat i z konce Mendělejevovy tabulky, tj. štěpením jader těžkých, a to dvou izotopů uranu a dvou izotopů plutonia.



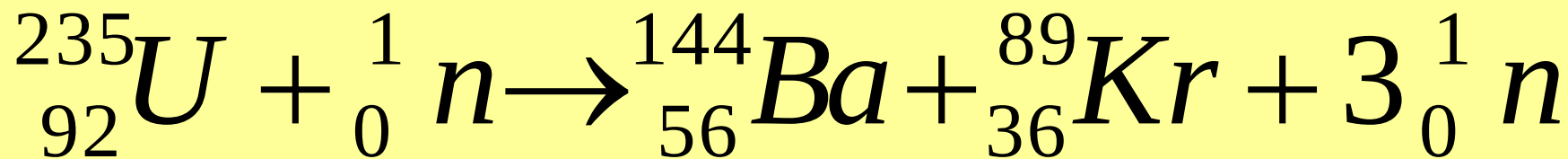
plutonium



uran

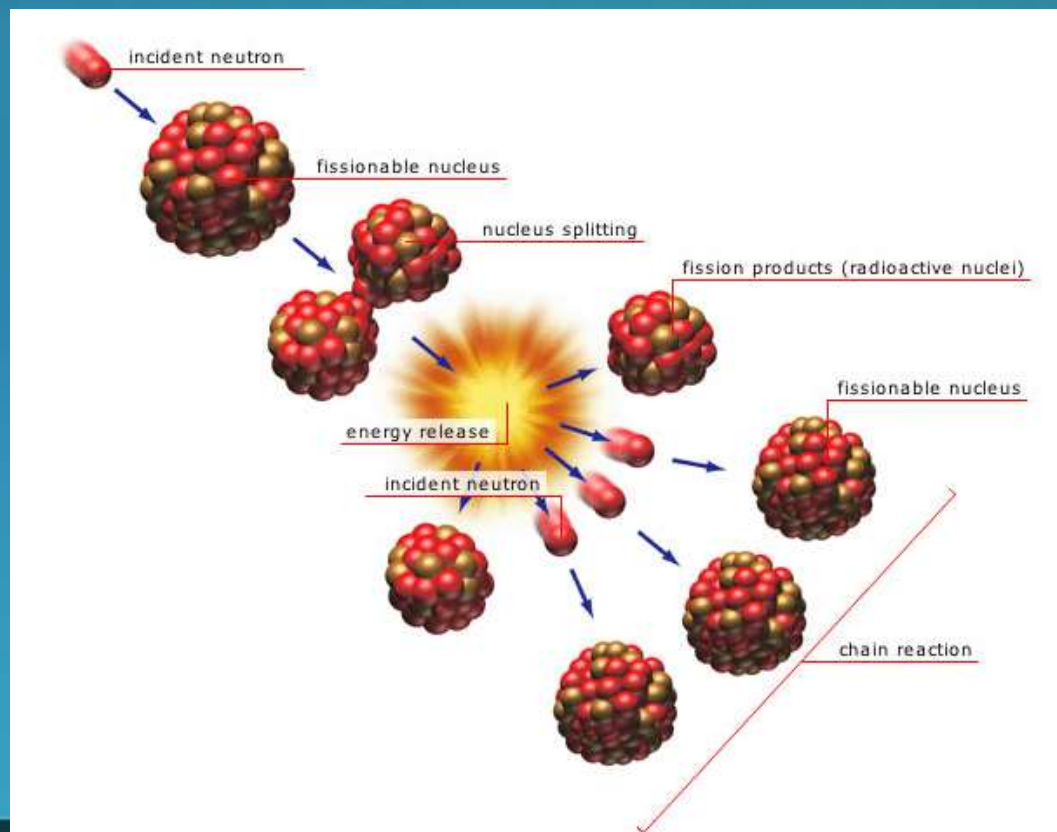
Jaderné štěpení

- Jestliže do takového jádra narazí pomalý (tepelný) neutron, jádro jej absorbuje a změní se v nestabilní jádro.
- Toto jádro se vzápětí rozštěpí na dva přibližně středně hmotné fragmenty a na tři neutrony, přičemž se uvolní energie 220 MeV!
- Každý z takto vzniklých neutronů rozštěpí opět tři jádra a celý proces se opakuje.

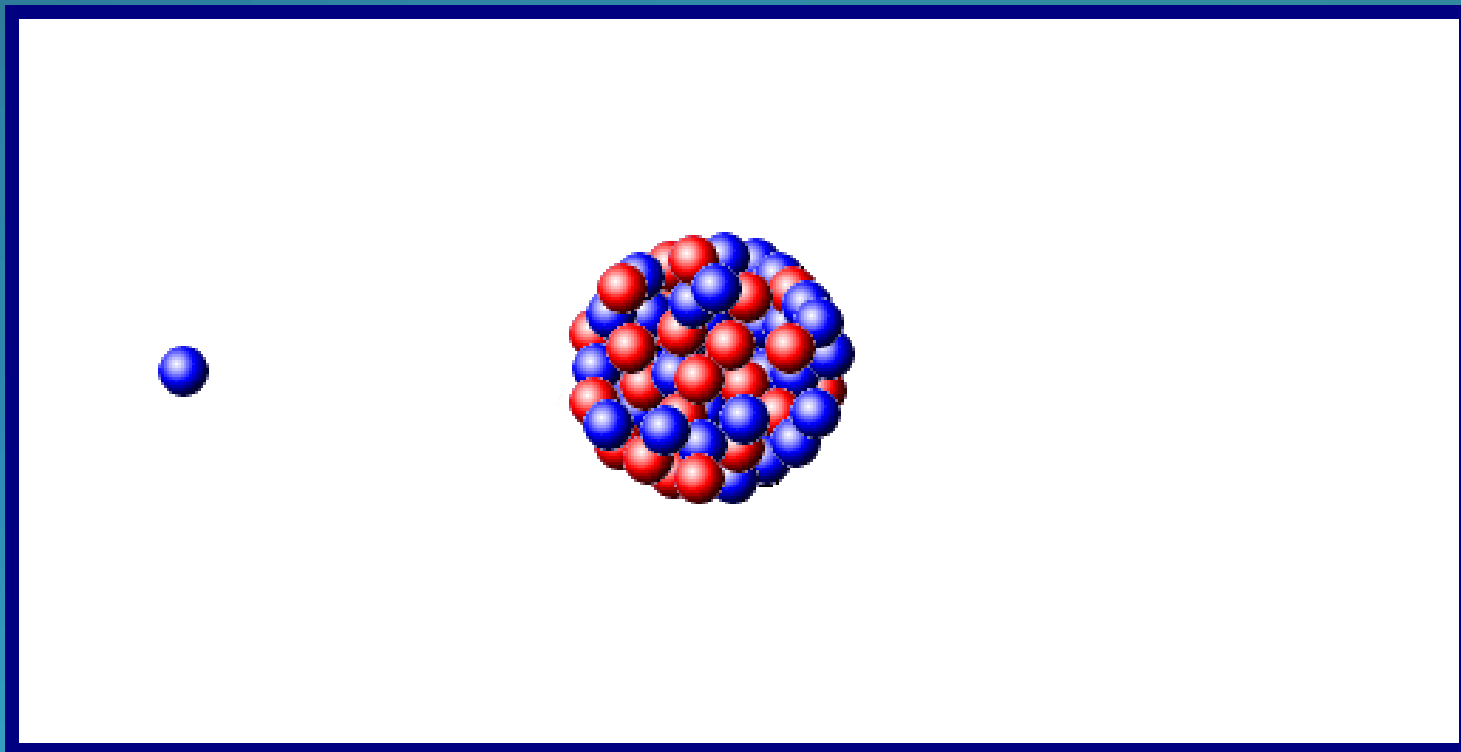


Jaderné štěpení

- Počet rozštěpených jader a tím i množství uvolněné energie roste s časem exponenciálně a celý proces je tak rychlý, že má charakter výbuchu.
- Mluvíme o řetězové jaderné reakci.



Štěpení jádra uranu pomalým neutronem:



Jaderné štěpení

- V přírodě však tato reakce neprobíhá, protože přírodní uran obsahuje pouze 0,72 % uranu 235, kdežto zbytek připadá na balast - uran 238.
- Koncentraci uranu 235 zvyšujeme procesem zvaným obohacování, při němž můžeme použít pouze fyzikální nikoli však chemické metody.
- Pro výrobu jaderné zbraně je potřeba uran 235 s čistotou 95 %, palivové články do jaderných reaktorů jsou obohaceny na cca 5 %.

Rozpadové řady

$^{238}_{92}\text{U}$ Uranová ($^{206}_{82}\text{Pb}$)

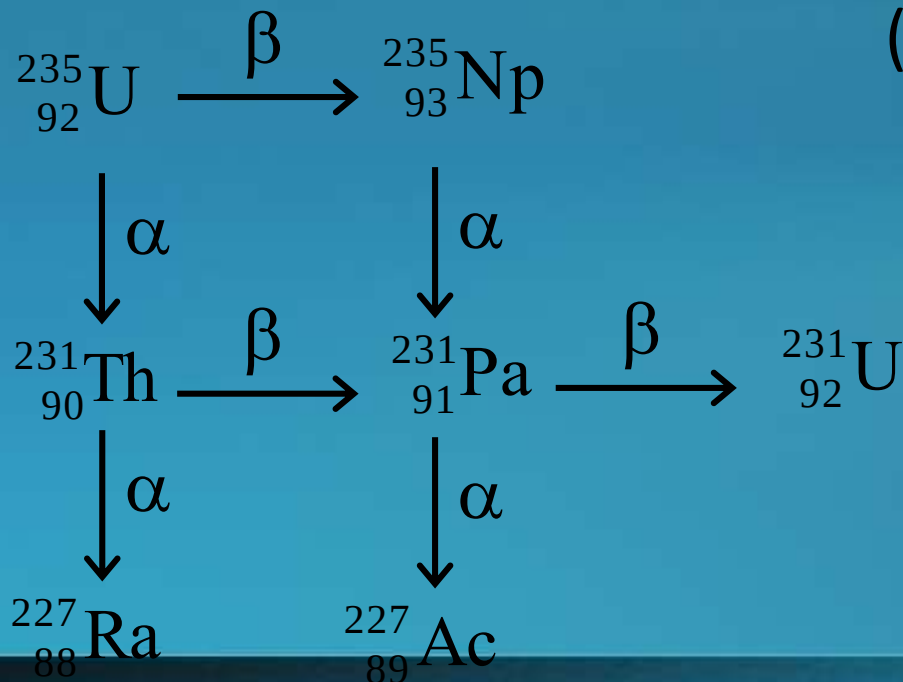
$^{237}_{93}\text{Np}$ Neptuniová ($^{209}_{83}\text{Bi}$)

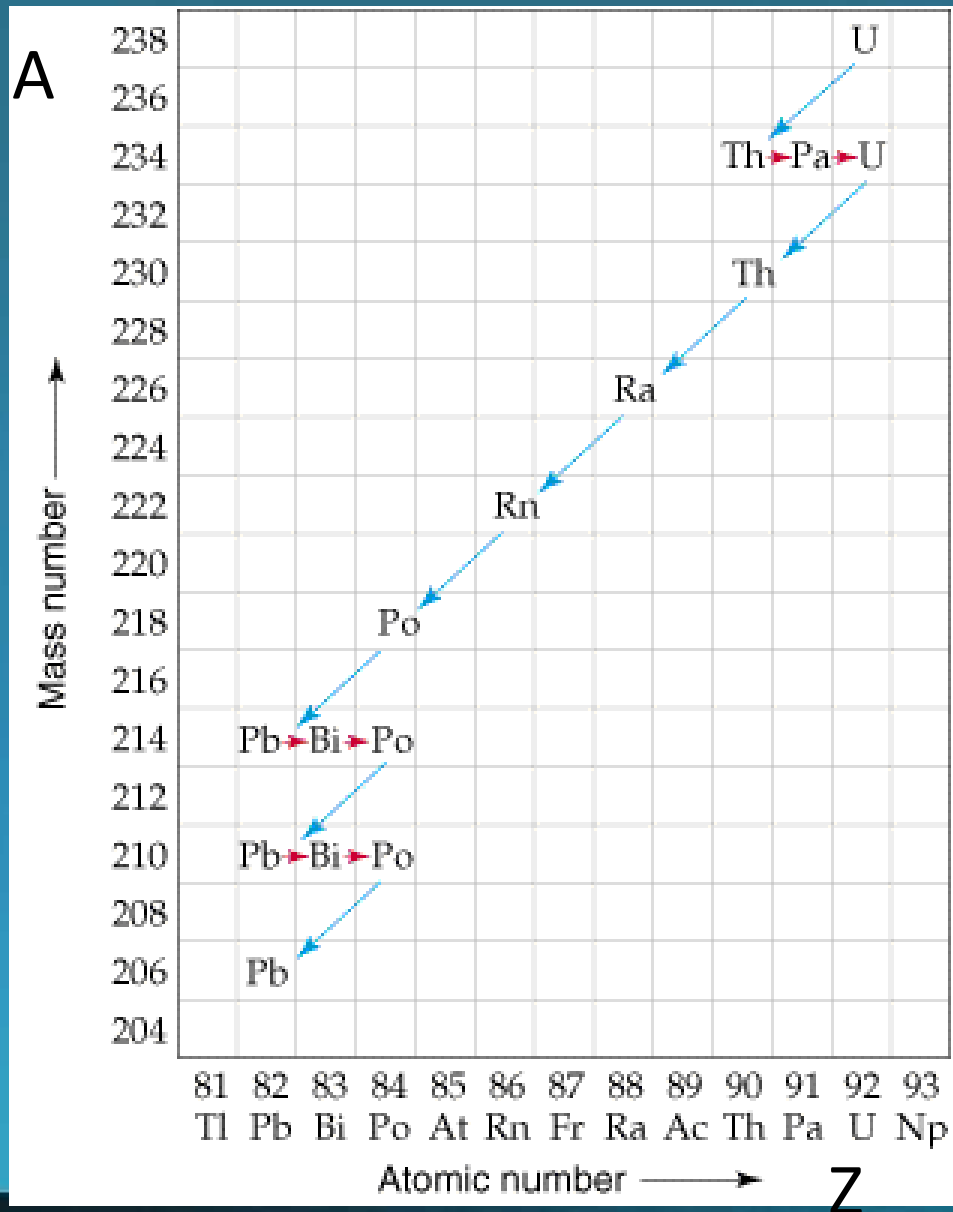
$^{232}_{90}\text{Th}$ Thórová ($^{208}_{82}\text{Pb}$)

$^{235}_{92}\text{U}$ Aktiniová ($^{207}_{82}\text{Pb}$)

Čtyři rozpadové řady dány snížením počtu nukleonů o 4 při rozpadu α a zachováním počtu nukleonů při rozpadu β

Rozpadové řady končí stabilními izotopy olova $^{206}_{82}\text{Pb}$ (bizmutu $^{209}_{83}\text{Bi}$)





β záření



α záření

Obohacování uranu

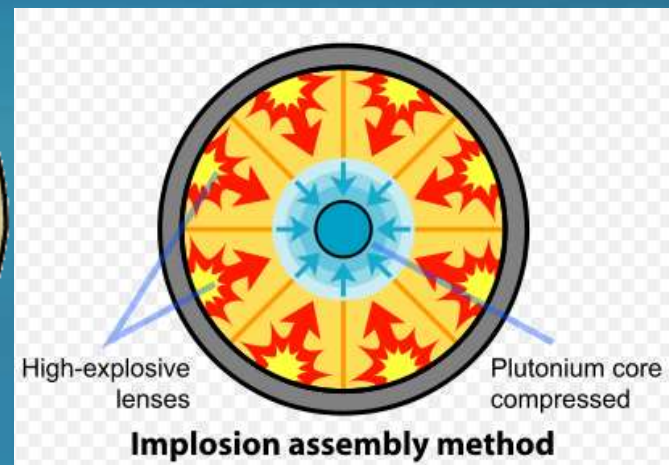
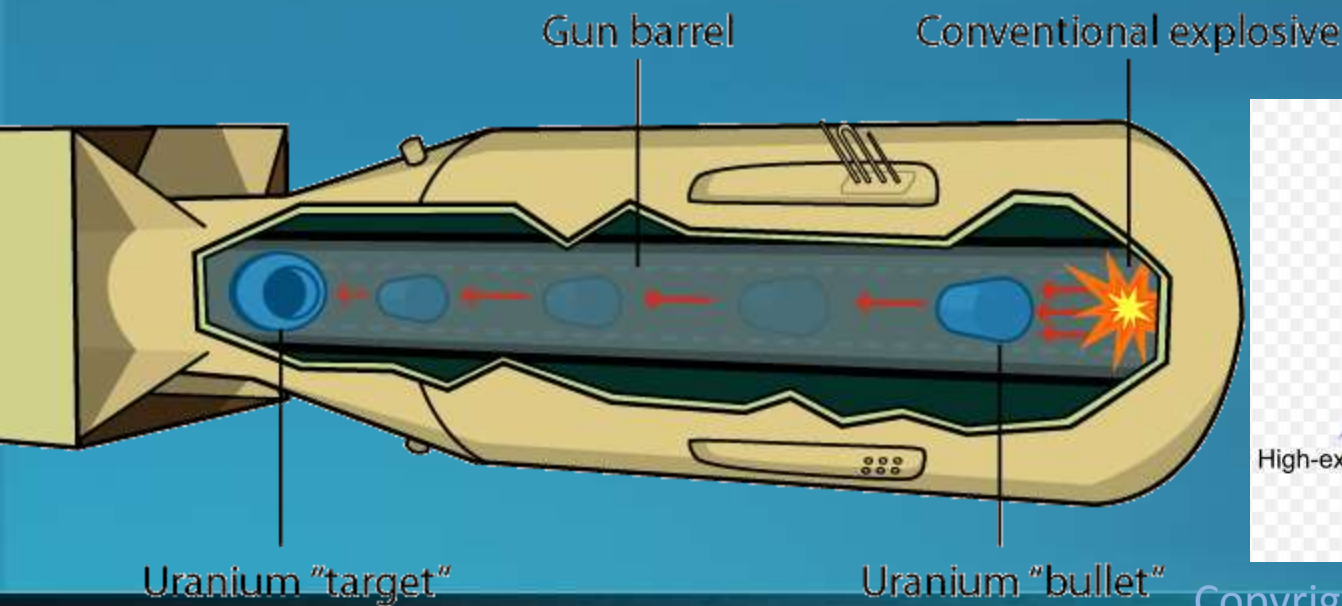
- Koncentraci uranu 235 zvyšujeme procesem zvaným obohacování, při němž můžeme použít pouze fyzikální nikoli však chemické metody.
- Pro výrobu jaderné zbraně je potřeba uran 235 s čistotou 95 %, palivové články do jaderných reaktorů jsou obohaceny na cca 5 %.
- Přírodní uran nejdříve sloučíme s halovým prvkem, čímž jej převedeme do plynného skupenství. Tento plyn pak necháme procházet odstředivkami.
- Chceme-li získat uran 235 v koncentraci vhodné pro výrobu jaderné zbraně v dostatečném množství, musíme těchto odstředivek použít tisíce.
- Celý proces je proto finančně a energeticky náročný.

Kritické množství

- Ale ani v takto obohaceném uranu nemusí řetězová reakce proběhnout, pokud ho není „dostatečné“ množství.
- Pokud je totiž uranu tzv. podkritické množství, neutrony z něj vyletí dříve než mohou způsobit řetězovou reakci.
- Reakce se samovolně rozběhne teprve při tzv. nadkritickém množství.
- Koule z uranu 235 musí mít hmotnost asi 50 kg, tj. průměr 18 cm, plutoniová pak cca 10 kg.

Jaderná zbraň

- Obsahuje dvě podkritická množství uranu 235, která se pomocí trhaviny spojí v množství nadkritické. Tím dojde k jadernému výbuchu.
- Protože uran 235 o vysoké čistotě nelze získat v dostatečném množství, nahrazujeme jej plutoniem, které se štěpí obdobně.

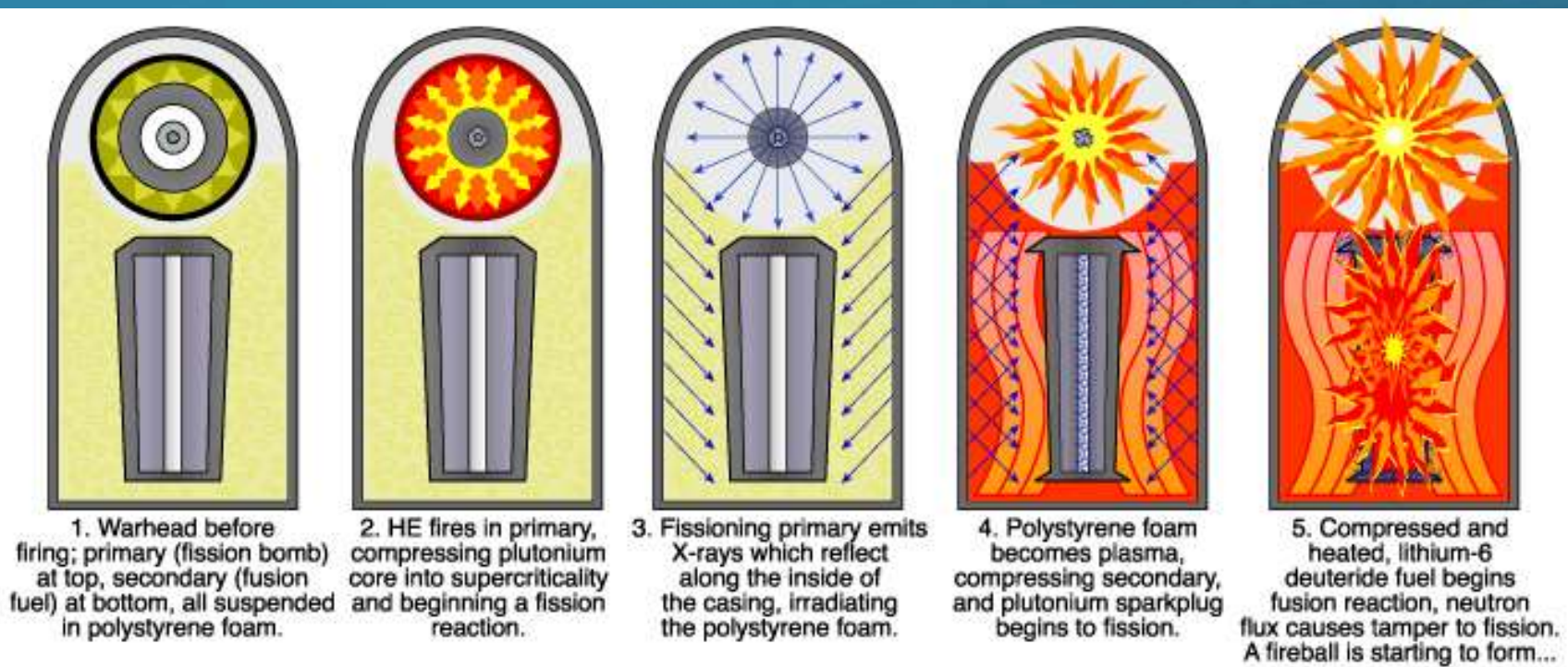


Jaderná zbraň

- Plutonium je pak obsaženo ve významném množství ve vyhořelých palivových článcích jaderných reaktorů.
- Jaderný výbuch se projeví:
 - oslepujícím zábleskem - „jasnější než tisíc sluncí“ (v epicentru je teplota řádově 10^6 K)
 - pronikavou radiací (hlavě RTG záření a záření gama)
 - tlakovou vlnou
 - typickým „jaderným hřibem“ obsahujícím obrovské množství radioaktivní horniny, která z něj vypadává na zem jako radioaktivní spad

Vodíková bomba

- Extrémní energie se uvolňuje při výbuchu vodíkové bomby. Vzniká při termionukleárních reakcích, k jejichž zažehnutí je nutný jaderný výbuch klasické plutoniové bomby.



Hirošima

- Dne 6. srpna 1945 byla jaderná bomba svržena na japonské město Hirošimu. Zabila 80.000 lidí.
- Dne 9. srpna 1945 explodovala plutoniová bomba nad městem Nagasaki, kde zabila asi 40.000 lidí.



uranová bomba Little Boy
ekvivalentní 14,5 kt TNT



jaderná bomba Fat Man
ekvivalentní 23 kt TNT

Car bomba

- Nejničivější výbušný systém v dějinách zkonstruoval SSSR; dne 30. října roku 1960 vybuchla nad Novou zemí vodíková bomba zvaná „Car“ o síle 50 Mt TNT. (původně 100 Mt).



Car bomba

- Car o hmotnosti 27 t explodoval 4 km nad zemí. Ohnivá koule se dotkla země a byla vidět na vzdálenost 1000 km. Na 100 km by způsobila popáleniny 3. stupně. Hřibovitý mrak vystoupal do výšky 60 km. Tlaková zničila vše do vzdálenosti 40 km a okna praskala až ve Finsku. Následné seismické vlny několikrát oběhly celou Zemi.

<http://www.youtube.com/watch?v=WwINPhn64TA&feature=related>

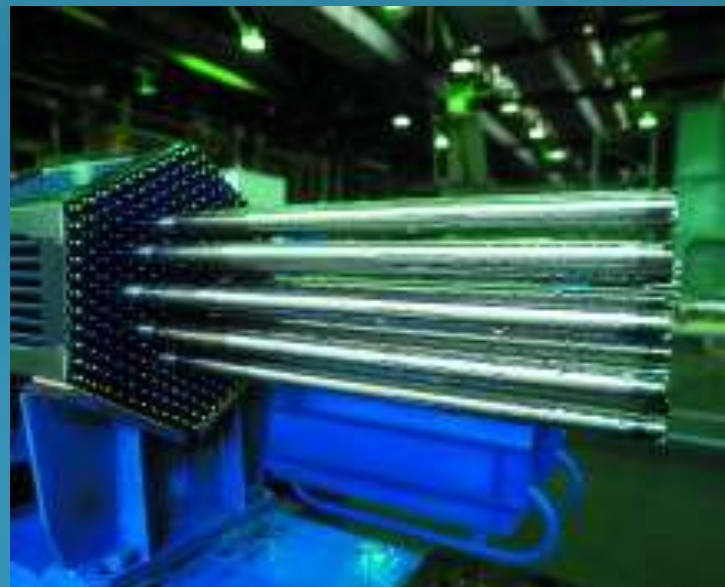
<http://www.youtube.com/watch?v=H9AMtUeyDP0>

Jaderný reaktor, jaderná elektrárna

- Původně zkonstruován k výrobě plutonia pro vojenské účely, nyní pracují reaktory energetické.
- V reaktoru probíhá řízená štěpná jaderná reakce. Nemá-li totiž dojít k jadernému výbuchu, musíme dva ze tří štěpením vzniklých neutronů zachytit.
- Reakce pak probíhá konstantní rychlostí.
- Reaktor je silnostěnná ocelová nádoba, v níž je tzv. aktivní zóna.

Aktivní zóna

- palivové kazety
 - Obsahují mírně obohacený uran (UO_2), ve formě tablet, které jsou umístěny v tyčích z odolného kovu.



Aktivní zóna

- Moderátor
- Rozštěpením jádra U vznikají rychlé neutrony, které další jádra štěpí obtížně. Moderátor tyto neutrony zpomaluje.
- Nejlepším moderátorem je těžká voda, můžeme však použít i vodu lehkou anebo grafit.

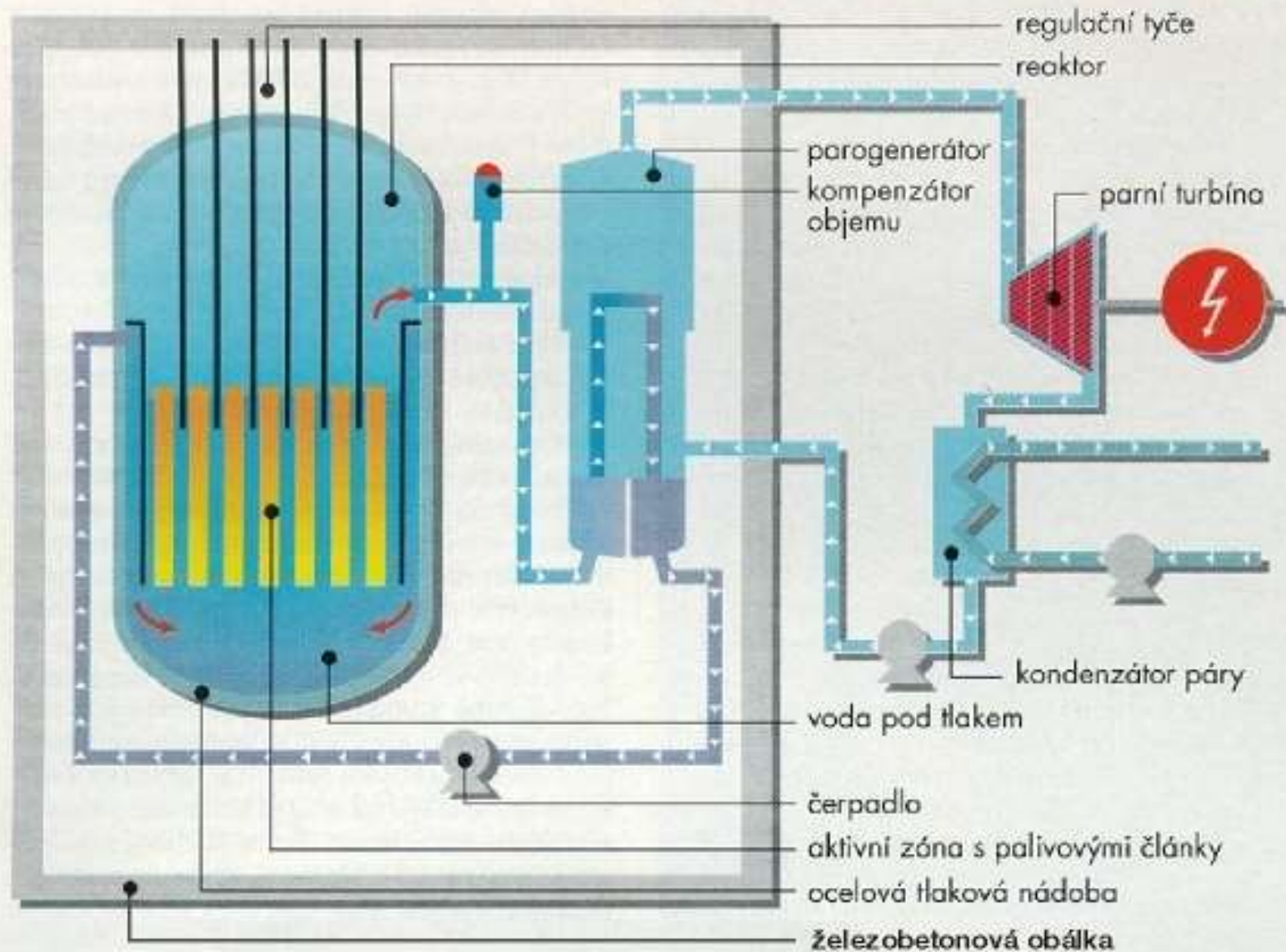
Aktivní zóna

- Regulační tyče
- Obsahují látku silně pohlcující neutrony (Cd, B). Jejich pohybem regulujeme rychlost reakce.



- Chladivo
 - Obvykle je to lehká voda, která zároveň představuje moderátor. Je však možné použít i plyny či tekutý sodík.
 - Chladivo odnímá teplo palivovým kazetám. Čerpadly je pak hnáno do výměníku, kde teplo odevzdá tzv. sekundárnímu okruhu. Pak se vrací zpět do reaktoru, čímž se uzavírá tzv. primární okruh.
- Protože v sekundárním okruhu je voda pod nižším tlakem, vaří se a vzniklá pára roztáčí turbínu s elektrickým generátorem.

Základní schéma jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem



první jaderný reaktor

- univerzita v Chicagu, 1942

